

repository.ub.ac.id

**ANALISIS PENGARUH KONSTRUKSI SISTEM  
PEMBUANGAN EMISI SEPEDA MOTOR TERHADAP  
KONSENTRASI  $PM_{0,1}$**

**SKRIPSI**

**Oleh:**

**SUSANA MAHARANI W.P  
145090801111013**



**PROGRAM STUDI INSTRUMENTASI  
JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
MALANG  
2018**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



repository.ub.ac.id

**ANALISIS PENGARUH KONSTRUKSI SISTEM  
PEMBUANGAN EMISI SEPEDA MOTOR TERHADAP  
KONSENTRASI  $PM_{0,1}$**

**SKRIPSI**

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains  
dalam bidang Fisika

Oleh :

**SUSANA MAHARANI W.P  
145090801111013**



**PROGRAM STUDI INSTRUMENTASI  
JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
MALANG  
2018**





# LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

## ANALISIS PENGARUH KONSTRUKSI SISTEM PEMBUANGAN EMISI SEPEDA MOTOR TERHADAP KONSENTRASI $PM_{0,1}$

Oleh :

**SUSANA MAHARANI W.P**  
**145090801111013**

Telah dipertahankan di depan Majelis Penguji  
pada tanggal.....  
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar Sarjana  
Sains dalam bidang Fisika

Pembimbing I

Pembimbing II

**(Drs. Arinto Yudi P.W.,M.Sc.,Ph.D)**  
**NIP. 196407021989031001**

**(Drs. Wasis, M.AB)**  
**NIP. 195511091984031001**

**Mengetahui,**

Ketua Jurusan Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Brawijaya

**(Prof. Dr. rer. nat. Muhammad Nurhuda)**  
**NIP. 196409101990021001**



**Halaman ini sengaja dikosongkan**

**LEMBAR PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Susana Maharani W.P  
NIM : 145090801111013  
Jurusan : Fisika  
Prodi : Instrumentasi  
Penulis Tugas Akhir Berjudul :

**ANALISIS PENGARUH KONSTRUKSI SISTEM  
PEMBUANGAN EMISI SEPEDA MOTOR TERHADAP  
KONSENTRASI PM<sub>0,1</sub>**

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Skripsi ini adalah benar-benar karya saya sendiri, dan bukan hasil plagiat dari karya orang lain. Karya-karya yang tercantum dalam Daftar Pustaka Skripsi ini, semata-mata digunakan sebagai acuan/referensi.
2. Apabila kemudian hari diketahui bahwa isi Skripsi saya merupakan hasil plagiat, maka saya bersedia menanggung akibat hukum dari keadaan tersebut.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, 3 Oktober 2018  
Yang menyatakan,

(Susana Maharani W.P)  
NIM. 145090801111013



**Halaman ini sengaja dikosongkan**

# ANALISIS PENGARUH KONSTRUKSI SISTEM PEMBUANGAN EMISI SEPEDA MOTOR TERHADAP KONSENTRASI $PM_{0,1}$

## ABSTRAK

Udara merupakan campuran gas yang sangat esensial bagi kehidupan, baik manusia, hewan maupun tumbuhan. Udara tercemar mengandung partikulat yang berbahaya bagi tubuh makhluk hidup. Tidak hanya berbahaya bagi pernapasan manusia, tumbuhan juga bisa menjadi kering dan mati apabila udara mengandung polutan. Polutan adalah zat atau bahan yang dapat mengakibatkan pencemaran terhadap lingkungan baik pencemaran udara, tanah, air, dsb. Kendaraan bermotor atau transportasi darat sangat berpengaruh terhadap kualitas udara akibat sejumlah polutan yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konstruksi knalpot dan konsentrasi  $PM_{0,1}$  sebelum dan sesudah melewati sampel knalpot yang berbeda dari sebuah sepeda motor untuk mendapatkan knalpot yang efisien terhadap pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$  yang diketahui dari persentase pengurangan konsentrasi. Penelitian dilakukan dengan menggunakan lima buah knalpot sepeda motor dengan jenis yang berbeda, P-Trak *Ultrafine Particle Counter* model 8525, termokopel tipe K, dan satu buah sepeda motor *matic*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konstruksi dan temperatur knalpot dapat mempengaruhi pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$ .

Kata kunci : Emisi,  $PM_{0,1}$ , knalpot

**Halaman ini sengaja dikosongkan**



# ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE CONSTRUCTION OF THE MOTORCYCLE EMISSIONS EXHAUST SYSTEM ON THE $PM_{0,1}$ CONCENTRATION

## ABSTRACT

Air is a gas mixture that is essential for human, animal and plant life. Tainted air contains particulates that are harmful to the bodies of living things. Not only harmful to human respiration, plants but also become dry and die when air contains pollutants. Pollutants are substances or materials that can cause pollution to the environment either air pollution, soil or water. Motor vehicles or land transportation is very influential on air quality due to the number of pollutants produced. This study aims to analyze the exhaust construction and  $PM_{0,1}$  concentrations before and after passing different exhaust samples from a motorcycle to obtain an efficient exhaust on reducing the known concentration of  $PM_{0,1}$  from the concentration reduction percentage. The research was conducted using five different motorcycle exhausts, P-Trak *Ultrafine Particle Counter* 8525 model, K type thermocouple, and one *matic* motorcycle. The results showed that construction and exhaust temperature can affect the reduction of  $PM_{0,1}$  concentration.

Keywords : Emission,  $PM_{0,1}$ , exhaust



**Halaman ini sengaja dikosongkan**



## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Analisis Pengaruh Konstruksi Sistem Pembuangan Emisi Sepeda Motor Terhadap Konsentrasi PM<sub>0,1</sub>”**. Skripsi ini ditulis sebagai syarat awal untuk melakukan penelitian. Penulisan skripsi ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan dari banyak pihak, maka dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa atas karuniaNya sehingga pengerjaan dan penulisan skripsi ini dapat berjalan dengan lancar.
2. Drs. Arinto Yudi P.W, M.Sc.,Ph.D selaku dosen pembimbing pertama yang telah membimbing penulis dalam penelitian ini.
3. Drs. Wasis, M.AB selaku dosen pembimbing kedua yang telah menyediakan banyak waktu, tenaga, saran, dan bimbingannya dari pengajuan judul sampai dengan selesainya skripsi ini.
4. Prof. Dr. rer. nat. Muhammad Nurhuda selaku Ketua Jurusan Fisika, Universitas Brawijaya.
5. Terimakasih saya sampaikan untuk kedua orang tua dan keluarga besar yang selalu mendoakan, menyemangati, serta tidak henti-hentinya memberikan nasihat sehingga penulis semangat dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Terimakasih banyak kepada mas Arif Budianto, S.Si., M.Si , mas Eko Teguh S.Si , mbak Mia Anggun, S.Si , mas Arsyah Karismadika, S.Si, mas Fikri, mas Rijal Pamungkas, S.Si, dan mas Ramadian Faizul Musafak, S.Si yang sudah membantu dan memberi saran dalam proses penelitian skripsi ini.
7. Teruntuk Peter Dewa Hendrayana yang telah menemani, mendukung, memberi semangat untuk penulis, dan membantu dalam penyelesaian skripsi ini.
8. Terimakasih kepada teman-teman dan sahabat atas dukungan dan doanya khususnya teman seperjuangan dalam skripsi ini, Ikta Fiana yang saling menyemangati dan mengingatkan serta mau kerjasama selama penelitian untuk skripsi ini.
9. Terimakasih untuk teman-teman angkatan Jurusan Fisika, Prodi Instrumentasi, serta keluarga Youth Alive yang selalu menyemangati dan mendoakan.

10. Serta pihak-pihak lain yang mendukung yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan baik dari segi isi maupun penyajian yang masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun guna membantu perbaikan dan menyempurnakan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat diterima dan tujuan penelitian dapat tercapai.

Malang, 3 Oktober 2018

Penulis



## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	iii
LEMBAR PERNYATAAN .....	v
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Udara.....	5
2.2 Pencemaran Udara.....	5
2.3 Sumber Pencemaran Udara .....	6
2.4 PM ( <i>Particulate Matter</i> ).....	8
2.5 Dampak Partikulat Terhadap Kesehatan Manusia .....	10
2.6 Knalpot Sepeda Motor.....	11
2.7 Perambatan Panas.....	13
2.8 Termokopel .....	14
2.9 P-Trak <i>Ultrafine Particle Counter</i> (TSI, Model 8525) ..	15
BAB III METODOLOGI .....	19

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	19
3.2 Alat dan Bahan .....	19
3.3 Diagram Alur Penelitian.....	20
3.3.1 Persiapan Alat untuk Pengukuran $PM_{0,1}$ .....	21
3.3.2 Pengukuran Konsentrasi $PM_{0,1}$ .....	21
3.3.3 Pengukuran Temperatur.....	22
3.3.4 Analisis Data Emisi $PM_{0,1}$ .....	22
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	23
4.1 Konstruksi Knalpot.....	23
4.2 Konsentrasi $PM_{0,1}$ .....	29
4.3 Pengurangan Konsentrasi $PM_{0,1}$ .....	30
4.4 Pembahasan .....	33
BAB V PENUTUP .....	43
5.1 Kesimpulan.....	43
5.2 Saran.....	43
DAFTAR PUSTAKA.....	45
LAMPIRAN .....	49

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Rata-rata tingkat polusi udara.....	6
Gambar 2.2 Sumber pencemaran udara .....	7
Gambar 2.3 Pendekatan distribusi massa PM .....	8
Gambar 2.4 Diameter beberapa partikel.....	9
Gambar 2.5 Dampak partikulat terhadap kesehatan.....	11
Gambar 2.6 Knalpot dengan <i>Catalytic Converter</i> .....	12
Gambar 2.7 P-Trak <i>Ultrafine Particle Counter</i> .....	15
Gambar 2.8 Fungsi bagian-bagian P-Trak.....	16
Gambar 3.1 Diagram alur penelitian .....	20
Gambar 3.2 Skema penelitian .....	21
Gambar 4.1 Konstruksi knalpot dengan jenis yang berbeda .....	23
Gambar 4.2 Skema konstruksi knalpot 1.....	24
Gambar 4.3 Skema konstruksi knalpot 2.....	25
Gambar 4.4 Skema konstruksi knalpot 3.....	26
Gambar 4.5 Skema konstruksi knalpot 4.....	27
Gambar 4.6 Skema konstruksi knalpot 5.....	28
Gambar 4.7 Grafik waktu terhadap konsentrasi $PM_{0,1}$ .....	29
Gambar 4.8 Grafik waktu terhadap persentase PK $PM_{0,1}$ .....	33
Gambar 4.9 Diagram konsep pembahasan .....	34
Gambar 4.10 Skema sistem manipulasi udara.....	37
Gambar 4.11 Grafik Hubungan $\Delta T$ dan Persentase PK (%) .....	40

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Jenis PM berdasarkan ukuran diameternya .....9

Tabel 2. Perbandingan euro 1 hingga euro 5 ..... 13

Tabel 3. Jenis kendaraan dan bahan knalpot ..... 19



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Konstruksi knalpot 1 tampak atas.....	49
Lampiran 2	Konstruksi knalpot 1 tampak depan .....	49
Lampiran 3	Konstruksi knalpot 1 tampak samping .....	50
Lampiran 4	Knalpot 1 isometri .....	50
Lampiran 5	Konstruksi knalpot 2 tampak atas.....	51
Lampiran 6	Konstruksi knalpot 2 tampak depan .....	51
Lampiran 7	Konstruksi knalpot 2 tampak samping .....	52
Lampiran 8	Knalpot 2 isometri .....	52
Lampiran 9	Konstruksi knalpot 3 tampak atas.....	53
Lampiran 10	Konstruksi knalpot 3 tampak depan .....	53
Lampiran 11	Konstruksi knalpot 3 tampak samping .....	54
Lampiran 12	Knalpot 3 isometri .....	54
Lampiran 13	Konstruksi knalpot 4 tampak atas.....	55
Lampiran 14	Konstruksi knalpot 4 tampak depan .....	55
Lampiran 15	Konstruksi knalpot 4 tampak samping .....	56
Lampiran 16	Knalpot 4 isometri .....	56
Lampiran 17	Konstruksi knalpot 5 tampak atas.....	57
Lampiran 18	Konstruksi knalpot 5 tampak depan .....	57
Lampiran 19	Konstruksi knalpot 5 tampak samping .....	58
Lampiran 20	Knalpot 5 isometri .....	58
Lampiran 21	Pengurangan konsentrasi knalpot 1.....	58
Lampiran 22	Pengurangan konsentrasi knalpot 2.....	59
Lampiran 23	Pengurangan konsentrasi knalpot 3.....	59
Lampiran 24	Pengurangan konsentrasi knalpot 4.....	59
Lampiran 25	Pengurangan konsentrasi knalpot 5.....	60
Lampiran 26	Data Konsentrasi $PM_{0,1}$ Knalpot 1.....	62
Lampiran 27	Data Konsentrasi $PM_{0,1}$ Knalpot 2.....	64
Lampiran 28	Data Konsentrasi $PM_{0,1}$ Knalpot 3.....	66
Lampiran 29	Data Konsentrasi $PM_{0,1}$ Knalpot 4.....	68
Lampiran 30	Data Konsentrasi $PM_{0,1}$ Knalpot 5.....	70
Lampiran 31	Data Konsentrasi $PM_{0,1}$ Tanpa Knalpot.....	72
Lampiran 32	Rata-rata & standar deviasi Konsentrasi $PM_{0,1}$ ....	74
Lampiran 33	Mengukur dimensi knalpot.....	74
Lampiran 34	Kegiatan penelitian 1.....	74
Lampiran 35	Kegiatan <i>input</i> data saat penelitian.....	75
Lampiran 36	Konstruksi knalpot 1-5.....	75



**Halaman ini sengaja dikosongkan**



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Udara merupakan campuran gas yang sangat esensial bagi kehidupan, baik manusia, hewan maupun tumbuhan. Tanpa udara, makhluk hidup tidak dapat melanjutkan hidup dan kehidupannya. Udara merupakan anugerah dari Tuhan Yang Maha Esa yang harus dijaga kesegaran dan kebersihannya (tidak tercemar). Udara yang bersih dari atmosfer jika sudah tercemar tidak lagi baik bagi kehidupan makhluk hidup.

Udara tercemar mengandung partikulat yang berbahaya bagi tubuh makhluk hidup. Tidak hanya berbahaya bagi pernapasan manusia, tumbuhan juga bisa menjadi kering dan mati apabila udara mengandung polutan. Pada zaman modern seperti sekarang ini di mana terdapat banyak sekali perusahaan industri ataupun rumah tangga yang melakukan pembakaran yang akan mengakibatkan polusi udara. Pencemaran udara merupakan kerusakan terhadap udara yang disebabkan oleh berbagai sumber, seperti asap kendaraan, asap pabrik, limbah industri, limbah rumah tangga, dan lain sebagainya.

Polutan adalah zat atau bahan yang dapat mengakibatkan pencemaran terhadap lingkungan baik pencemaran udara, tanah, air, dsb. Polusi atau pencemaran lingkungan adalah berubahnya tatanan lingkungan oleh kegiatan manusia atau oleh proses alam sehingga kualitas lingkungan turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan lingkungan menjadi kurang atau tidak dapat berfungsi lagi sesuai dengan fungsinya. Populasi di dunia dengan daerah yang memiliki tingkat polusi udara tertinggi mencapai persentase 92%. Sehingga polutan dapat merusak kesehatan manusia bahkan menyebabkan kematian (Budiyo, 2001).

Sebuah studi telah mengklarifikasikan polutan secara umum dalam empat kategori, yaitu polutan gas, *persistent organic pollutant*, *Particulate Matter* (PM), dan logam berat (Kampa & Castanas, 2008). PM<sub>0,1</sub> yang dikenal pula sebagai *ultrafine particle* memiliki ukuran diameter kurang dari 0,1  $\mu\text{m}$  (Hart dkk, 2015). PM<sub>0,1</sub> memiliki dampak negatif bagi kesehatan (Maysaroh dkk, 2015).

Faktor-faktor yang menyebabkan polutan atau emisi partikulat sangat penting untuk diketahui, sehingga penulis tertarik untuk menganalisis sistem pembuangan emisi sepeda motor sebagai topik skripsi. Selain itu, penelitian sebelumnya dalam hal pengurangan konsentrasi partikulat, dapat diatasi dengan menggunakan filter pada knalpot. Penulis meneliti dari segi bentuk konstruksi knalpot yang berbeda tanpa menggunakan filter. Sistem pembuangan emisi sepeda motor perlu dipelajari detailnya termasuk konstruksinya dalam hal pengurangan emisi, sehingga penulis dapat menyimpulkan knalpot yang lebih efisien untuk mengurangi konsentrasi emisi  $PM_{0,1}$ .

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana konstruksi masing-masing knalpot yang digunakan dalam penelitian?
2. Bagaimanakah konsentrasi  $PM_{0,1}$  sebelum dan sesudah melewati sampel knalpot yang berbeda-beda?
3. Bagaimanakah persentase pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$  akibat penggunaan knalpot yang berbeda-beda?

## 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Persentase pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$  didefinisikan sebagai persentase perbandingan konsentrasi  $PM_{0,1}$  sebelum dan sesudah melewati knalpot.
2. Hanya mengukur  $PM_{0,1}$ .
3. Knalpot yang digunakan sebanyak 5 buah dan sesuai bentuk dari pabrikannya dan tidak membahas bahan dasar setiap knalpot.
4. Pengulangan dan perlakuan setiap knalpot dan setiap keadaan dibuat sama dan diusahakan suhu dan parameter lain dibuat sama yakni pada ruangan semi terbuka.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis konstruksi knalpot dan konsentrasi  $PM_{0,1}$  sebelum dan sesudah melewati sampel knalpot yang berbeda dari sebuah sepeda motor untuk mendapatkan knalpot yang efisien terhadap pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$  yang diketahui dari persentase pengurangan konsentrasi.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah mengetahui struktur knalpot sepeda motor yang dapat mengurangi emisi  $PM_{0,1}$ . Sehingga penulis dan pembaca menambah pengetahuan bahwa partikulat di udara khususnya  $PM_{0,1}$  dipengaruhi oleh beberapa faktor sesuai penelitian penulis.



**Halaman ini sengaja dikosongkan**



## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Udara**

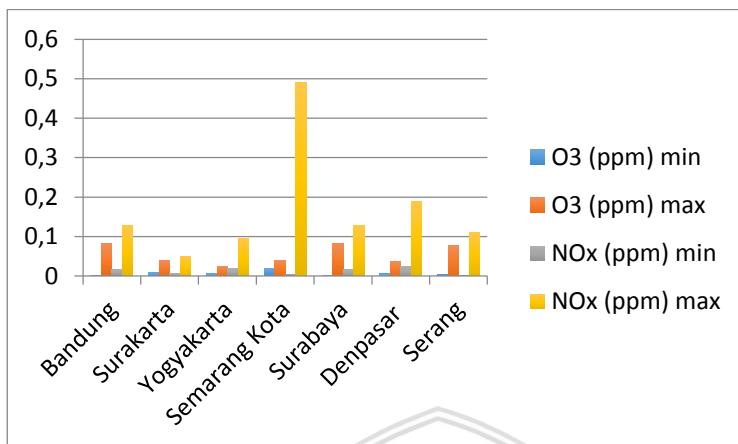
Udara merupakan campuran beberapa macam gas yang perbandingannya tidak tetap, tergantung pada keadaan suhu udara, tekanan udara, dan suhu lingkungan. Udara mengandung oksigen untuk bernafas, karbondioksida untuk proses fotosintesis oleh klorofil daun dan ozon untuk menahan sinar ultraviolet (Sugiarti,2009).

Udara juga merupakan faktor penting dalam kehidupan. Namun seiring dengan berjalannya waktu dan perkembangan dalam dunia industri dan transportasi menyebabkan perubahan kualitas udara menjadi menurun (Ismiyati dkk, 2014).

#### **2.2 Pencemaran Udara**

Pencemaran udara adalah peristiwa masuknya atau tercampurnya polutan ke dalam lapisan udara yang dapat mengakibatkan menurunnya kualitas udara. Umumnya, polutan yang mencemari udara berupa gas dan asap. Gas dan asap tersebut berasal dari hasil proses pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna, yang dihasilkan oleh mesin-mesin pabrik, pembangkit listrik dan kendaraan bermotor. Selain itu, gas dan asap merupakan hasil oksidasi dari berbagai unsur penyusun bahan bakar, yaitu CO<sub>2</sub> (karbondioksida), CO (karbonmonoksida), SO<sub>x</sub> (belerang oksida) dan NO<sub>x</sub> (Nitrogen Oksida) (Kusminingrum dkk, 2008).

Adapun penelitian yang telah dilakukan oleh Kusminingrum periode 2008 mengenai polusi udara di beberapa kota besar seperti pada Gambar 2.1 berikut ini. Diantara 7 kota besar sebagai sampel penelitian, kandungan NO<sub>x</sub> tertinggi yaitu di Semarang Kota dengan perolehan konsentrasi 0,49 ppm.



**Gambar 2.1** Rata-rata tingkat polusi udara di beberapa kota besar (Kusminingrum dkk, 2008)

Polusi udara menjadi berita yang hangat di beberapa kota seperti London, Inggris dan sekitarnya. Di Beijing pun masalah polusi udara ini menjadi perhatian khusus dan cara yang efektif untuk mengatasinya harus menjadi prioritas oleh pemerintah (Fan dkk, 2018).

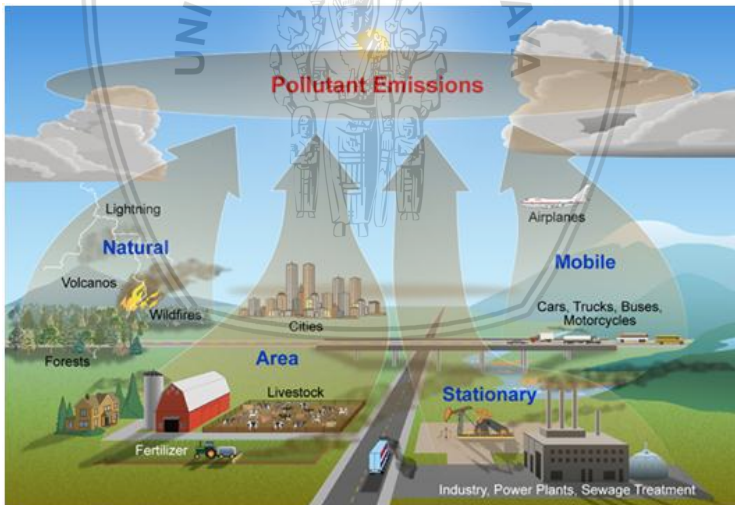
Polusi udara merupakan kualitas udara yang terdegradasi dan disebabkan oleh aktivitas manusia serta berkaitan dengan tingkat kematian per tahun di seluruh dunia. Pencemaran udara dapat dihilangkan dengan berbagai cara untuk mengurangi emisi (Donahue, 2018).

### 2.3 Sumber Pencemaran Udara

Ada tiga kategori sumber dari polusi udara yaitu yang pertama adalah natural (segala sesuatu yang tidak ada hubungannya dengan aktivitas manusia), yang kedua yaitu *anthropogenic* (dihasilkan oleh aktivitas manusia) dan yang ketiga yaitu *secondary* (dibentuk oleh atmosfer dari polusi *natural* dan *anthropogenic*). Setiap kategori dapat dibagi lagi menjadi beberapa sub kategori. Sebagai contoh, polusi *anthropogenic* dapat diklasifikasikan menjadi stasioner (pabrik, kebun, rumah dan lainnya) dan kendaraan (mobil, truk, kapal, pesawat dan lainnya). Sub kategori lainnya seperti *indoor* dan *outdoor*, organik dan anorganik, atau lokal dan regional juga dapat

digunakan. Dari semua pilihan tersebut akan menghasilkan gambaran sumber dan emisi yang menyebabkan polusi udara (Alemani dkk, 2018).

Emisi kendaraan bermotor mengandung bermacam-macam senyawa kimia. Komposisi senyawa kimia tergantung pada jenis mesin, alat pengendali emisi bahan bakar, suhu operasi dan faktor lainnya. Bahan bakar pencemar yang dikeluarkan oleh kendaraan bermotor sama saja, baik itu bensin maupun solar. Namun, memiliki proporsi yang berbeda yaitu pada operasi mesin. Bahan pencemar kendaraan bermotor adalah karbonmonoksida (CO), hidrokarbon, oksida nitrogen (NO<sub>x</sub>), dan sulfur (SO<sub>x</sub>), serta timbal (Pb). Bahan bakar yang dilepas ke udara seperti hidrokarbon dan timbal oraganik terjadi karena adanya penguapan. Emisi gas buang kendaraan bermotor dapat membuat kondisi tanah dan air menjadi asam. Kondisi seperti ini dapat menyebabkan terlepasnya ikatan tanah atau sedimen dengan beberapa mineral atau logam yang dapat mencemari lingkungan (Tugaswati, 2008).



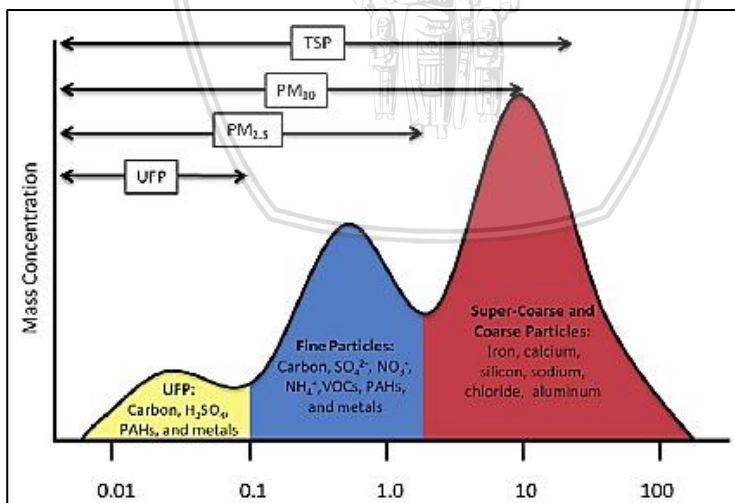
**Gambar 2.2** Sumber pencemaran udara (National Park Service,2018)

## 2.4 PM (*Particulate Matter*)

PM atau *Particulate Matter* merupakan istilah untuk partikel padatan maupun partikel cair di udara. Partikel ada yang bergerak dan stasioner sehingga sifat kimia dan fisika partikel sangat bervariasi. Partikulat adalah substansi di atmosfer di mana dalam keadaan normal berukuran lebih besar daripada molekul (2 Angstrom), tetapi lebih kecil dari 500  $\mu\text{m}$  ( $1\mu = 1 \text{ mikron} = 10^{-4} \text{ cm}$ ) (Alfiah, 2009).

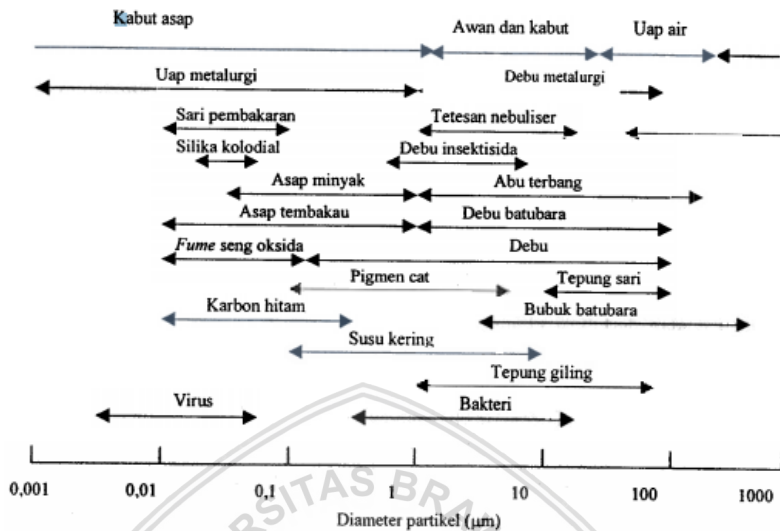
PM dibagi menjadi empat kategori, yaitu  $\text{PM}_{0.1}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ , dan TSP atau *Total Suspended Particles* yang memiliki diameter kurang dari 30  $\mu\text{m}$  (Sabaliauskas dkk, 2012).  $\text{PM}_{2.5}$  memiliki diameter antara 0,1  $\mu\text{m}$  sampai dengan 2,5  $\mu\text{m}$ .  $\text{PM}_{0.1}$  yang dikenal pula sebagai *ultrafine particle* memiliki ukuran diameter kurang dari 0,1  $\mu\text{m}$ . Karena perbedaan ukuran diameter, masing-masing jenis PM tersebut memiliki karakteristik yang berbeda-beda (Hart dkk, 2015).

Distribusi massa *Particulate Matter* di dalam atmosfer terdapat pada gambar 2.1. Berdasarkan teori, massa  $\text{PM}_{0.1}$  diabaikan karena ukurannya yang sangat kecil jika dibandingkan dengan *Particulate Matter* yang lainnya (Sabaliauskas dkk, 2012).



**Gambar 2.3** Pendekatan distribusi massa PM di dalam atmosfer (Sabaliauskas dkk,2012)





**Gambar 2.4** Diameter beberapa partikel (Suhariyono & Wiyono, 2003)

**Tabel 1.** Jenis PM berdasarkan ukuran diameternya

Jenis Partikel	Rentang Ukuran
PM <sub>10</sub> ( <i>Coarsed Particle</i> )	≤ 10 µm
PM <sub>2.5</sub> (FP)	≤ 2,5 µm
PM <sub>0.1</sub> (UFP)	≤ 0,1 µm

Sumber : (Asgharian dkk, 2012)

Partikel *ultrafine* merupakan partikel yang berukuran kurang dari 0,1 µm. Proses pembentukan partikel ini melalui kondensasi uap panas selama proses *combustion* dengan temperatur tinggi dan proses nukleasi material atmosferik yang membentuk partikel baru. Ukuran partikel *ultrafine* sangat kecil dan pergerakannya menyebabkan partikel-partikel ini bertabrakan satu dengan yang lainnya dan membentuk partikel baru yang lebih besar (R.D.Ratnani, 2008).

Partikel *ultrafine* mudah masuk ke dalam sirkulasi darah sistemik karena ukurannya yang sangat kecil. Partikel ini dapat masuk pada jaringan epitel paru dan aliran darah yang

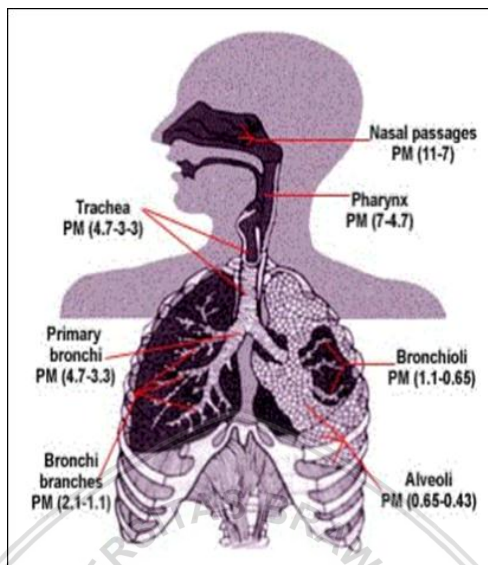
selanjutnya akan ditransfer ke organ-organ lain dalam tubuh, seperti hati, sumsum tulang, otak dan jantung (Maysaroh dkk, 2015)

## 2.5 Dampak Partikulat Terhadap Kesehatan Manusia

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, partikulat (PM) di atmosfer semakin meningkat pesat. Hal ini juga disebabkan oleh kemajuan teknologi. Sehingga partikulat merupakan salah satu masalah yang mempengaruhi kualitas udara dan perubahan iklim, serta berdampak pada kesehatan manusia dan lingkungan (Fuzzi dkk, 2015). Paparan akut partikulat terhadap kesehatan manusia mengganggu fungsi jantung dan dapat memicu *disautonomia parasimpatis* (Tobaldini dkk, 2018).

Kepadatan lalu lintas yang penuh dengan kendaraan akan memberi dampak terhadap kesehatan manusia karena paparan partikel *ultrafine* yang ada di dalam kendaraan tersebut (Bigazzi and Figliozzi, 2012). Partikulat dapat mempengaruhi sistem respirasi manusia dan masuknya partikulat ke dalam sistem respirasi dipengaruhi oleh ukuran partikulat tersebut. Ukuran partikulat yang dapat masuk ke dalam sistem respirasi manusia ialah kurang dari 10  $\mu\text{m}$  (Zannaria dkk, 2009). Beberapa studi epidemiologi dapat menyimpulkan adanya hubungan yang erat antara tingkat pencemaran udara perkotaan dengan angka kejadian (prevalensi) penyakit pernapasan (Tugaswati, 2008).

Partikulat dapat mengganggu kesehatan manusia terutama pada sistem pernapasan. Apabila seseorang terpapar partikulat, tentu akan mengganggu proses pernapasan. Gambar 2.5 dibawah ini terdapat keterangan masing-masing ukuran PM yang menyerang sistem pernapasan manusia.



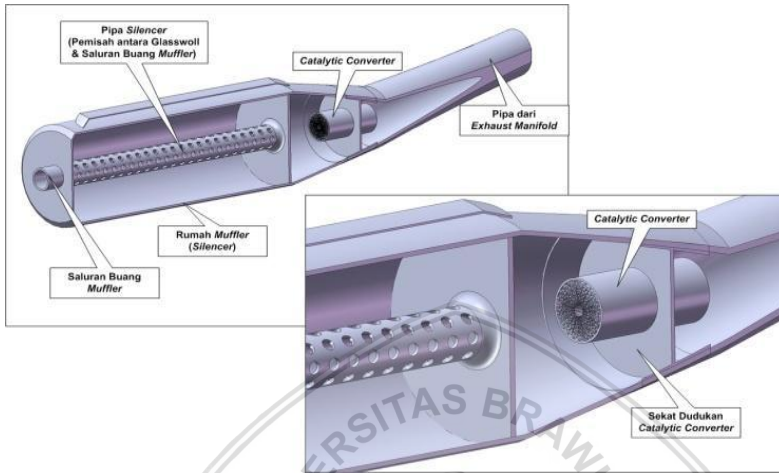
**Gambar 2.5** Dampak partikulat terhadap kesehatan manusia (Alfiah, 2009)

Gas pencemar udara memengaruhi kesehatan manusia seperti merusak susunan hemoglobin darah, penyakit ISPA (Infeksi Saluran Pernapasan Atas), iritasi tenggorokan, penyakit *pneumokinosi*, kardiovaskuler dan kanker (Sugiarti, 2009).

## 2.6 Knalpot Sepeda Motor

Jika suatu mesin dijalankan tanpa adanya knalpot, maka akan menimbulkan kebisingan yang mengganggu kenyamanan manusia. Bagian dalam knalpot terdapat suatu rangkaian perpipaan yang berfungsi untuk mengurangi kebisingan suara yang berasal dari suatu mesin kendaraan bermotor. Secara umum, terdapat dua jenis knalpot (*muffler*), yaitu *absortive muffler* dan *reactive muffler*. *Absortive muffler* adalah *muffler* yang dirancang khusus menggunakan peredam untuk menyerap gelombang suara yang keluar dari mesin tanpa mepedulikan tekanan gas buang. Sedangkan *reactive muffler* adalah *muffler* yang dirancang menggunakan ruang resonansi untuk menghilangkan gelombang

suara yang dipantulkan pada dinding-dinding *muffler* (Pamungkas, 2012).



**Gambar 2.6** Knalpot dengan *Catalytic Converter* (Sipahutar, 2011)

Konstruksi knalpot terdapat dua saluran utama, yaitu *header* dan *muffler*. *Header* adalah komponen bagian depan knalpot yang langsung berhubungan dengan kepala silinder yang berfungsi untuk menjaga tekanan pembuangan, sedangkan *silencer* terdapat pada bagian belakang knalpot yang berfungsi untuk mereduksi suara saat pembuangan (Pranoto, 2012).

Knalpot atau yang biasa disebut sebagai gas buang memiliki fungsi lain selain menyalurkan sisa pembakaran. Knalpot merupakan satu kesatuan dari proses langkah buang. Pada knalpot, efek turbulensi terus menerus terjaga. Fungsi lain daripada knalpot itu sendiri ialah sebagai peredam getaran. Getaran tersebut dihasilkan akibat gerakan naik turun piston dari kepala silinder yang diteruskan menuju *body* knalpot, rangka, dan sasis sehingga getaran mesin yang dihasilkan tidak besar (Zhao dkk, 2018).

Knalpot yang baik ialah knalpot yang memiliki mekanisme kerja yang baik secara mesin, bunyi yang dihasilkan, serta dapat meminimalisir gas buang. Tabel 2 berikut ini merupakan perbandingan sistem pembuangan emisi euro 1 sampai euro 5.

Sistem pembuangan yang digunakan pada tahun 2020 tersebut harapannya tidak boleh melebihi batas yang ada sesuai emisi yang tertera. Hal ini yang menjadi acuan supaya emisi partikulat di udara bisa terminimalisir.

**Tabel 2.** Perbandingan euro 1 hingga euro 5

	<b>Euro 1</b>	<b>Euro 2</b>	<b>Euro 3</b>	<b>Euro 4</b>	<b>Euro 5</b>
<b>Tahun</b>	1999	2005	2007	2016	2020
<b>CO</b>	13.0 g/km	5.5 g/km	2.0 g/km	1.14 g/km	1.00 g/km
<b>Hydrocarbons</b>	3.0 g/km	1.0 g/km	0.3 g/km	0.17 g/km	0.10 g/km
<b>NOx</b>	0.3 g/km	0.3 g/km	0.15 g/km	0.09 g/km	0.06 g/km
<b>SHED test</b>	n/a	n/a	n/a	yes	yes
<b>Onboard</b>				yes (OBD	yes (OBD
<b>Diagnostics</b>	no	no	no	1)	2)
<b>Durability test</b>	N/A	N/A	N/A	20,000 km	Lifetime

Sumber : (Motorcycle News, 2016)

Knalpot (*exhaust system*) merupakan salah satu bagian vital dari sebuah kendaraan bermotor. Gas buang pada sepeda motor disalurkan melalui knalpot dan dilepas ke udara. Konstruksi knalpot didesain untuk menampung gas buang dan meredam suara atau biasa disebut sebagai *silencer*. Memodifikasi panjang dan diameter knalpot akan mempengaruhi kemampuan sepeda motor (Sanata, 2011).

## 2.7 Perambatan Panas

Panas merupakan energi yang ditransfer dari satu sistem ke sistem yang lain dengan interaksi termal dan memiliki satuan panas yaitu joule (Meriyanto, 2013). *Heat transfer* merupakan proses berpindahnya energi kalor karena adanya perbedaan temperatur. Kalor tersebut akan berpindah dari temperatur tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Proses perpindahan panas terus berlangsung sampai mencapai kesetimbangan. Proses perpindahan panas ini dapat dibedakan menjadi tiga macam, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Perpindahan panas secara konduksi merupakan

perpindahan panas yang terjadi pada suatu media padat atau media fluida yang diam. Konduksi terjadi karena perbedaan temperatur permukaan yang satu dengan permukaan yang lainnya pada suatu media. Perpindahan panas secara konveksi merupakan perpindahan panas yang terjadi dari permukaan media padat atau fluida diam dan menuju fluida yang bergerak dan terjadi adanya perbedaan temperatur. Perpindahan panas secara radiasi merupakan perpindahan panas dari satu media ke media yang lain karena adanya perbedaan suhu tanpa melalui perantara (Wiranugraha dkk, 2016).

Konduksi merupakan proses perpindahan panas dari media dengan suhu yang lebih tinggi menuju media dengan suhu yang lebih rendah dengan media penghantar panas yang tetap. Konveksi merupakan proses perpindahan panas yang terjadi di antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir di sekitarnya dan media penghantarnya berupa fluida. Radiasi merupakan proses perpindahan panas yang terjadi karena pancaran gelombang elektromagnetik dan tanpa melalui perantara (Buchori, 2003).

## 2.8 Termokopel

Seebeck melakukan percobaan pada tahun 1822 dengan menghubungkan plat bismuth diantara kawat-kawat tembaga. Sambungan tersebut diberi suhu yang berbeda dan ternyata menimbulkan arus listrik. Arus tersebut mengindikasikan adanya beda potensial diantara kedua ujung sambungan. Apabila sambungan didinginkan, maka akan ada perubahan polaritas tegangan. Berdasarkan percobaan tersebut dapat disimpulkan adanya perbedaan suhu antara kedua logam tersebut menyebabkan munculnya gaya gerak listrik. Gaya gerak listrik yang muncul disebut gaya gerak listrik termo dan sumbernya disebut elemen termo. Kemudian rangkaian ini dikenal dengan nama termokopel (Sunardi, 2003).

Termokopel merupakan sistem pengukuran temperatur. Elemen sensor temperatur menghasilkan beda tegangan dimana *emf* yang dihasilkan akan dibandingkan dengan skala konversi tertentu menjadi unit temperatur. Elemen sensor sebuah termokopel merupakan dua jenis logam konduktor yang berbeda dan biasa disebut *termoelement*. Satu sama lain diisolasi kecuali

pada bagian *junction*. Kabel ekstensi termokopel yang dapat digunakan adalah sepasang kabel yang memiliki karakteristik temperatur *emf* relatif terhadap termokopelnya sehingga saat digunakan tidak memberikan pengaruh negatif terhadap hasil pengukuran (Sutarya, 2008).

## **2.9 P-Trak Ultrafine Particle Counter (TSI, Model 8525)**

P-trak *Ultrafine Particle Counter* Model 8525 digunakan untuk mengukur atau mendeteksi jumlah partikel berukuran nanometer (yaitu  $\leq 0,1 \mu\text{m}$ ) di udara. Dalam penelitian ini, P-Trak digunakan untuk mengukur emisi dari hasil pembakaran kendaraan bermotor jenis  $\text{PM}_{0,1}$  (Gambar 2.2).



**Gambar 2.7** P-Trak *Ultrafine Particle Counter* Model 8525 (TSI Incorporated, 2013)



Bagian-bagian dari P-Trak dan fungsi dari masing-masing bagian yang digunakan pada pengambilan data dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 2.8** Fungsi bagian-bagian P-Trak (TSI Incorporated, 2013)

Bagian-bagian dari P-Trak *Ultrafine Particle Counter Model 8525* terdiri dari *probe*, tombol *power on/off*, *jack DC power*, *sampling hose*, *audio jack*, *dataport*, *alcohol cartridge*, dan beberapa bagian lainnya. *Probe* berfungsi sebagai ujung dari alat pencacah data. *Probe* diletakkan berdekatan pada ujung knalpot. *Power on/off* berfungsi sebagai tombol untuk menghidupkan alat dan mematikan alat. *DC power* berfungsi sebagai penghubung alat ke power AC (yang kemudian diubah menjadi DC) agar alat mendapatkan suplai aliran listrik dan dapat dihidupkan. *Sampling hose* berfungsi sebagai jalannya udara yang masuk melalui probe, alat ini berbentuk pipa. *Audio jack* berfungsi sebagai port untuk mendengarkan suara pada alat. *Data port* berfungsi sebagai penghubung apabila data yang didapat akan diolah. *Alcohol cartridge* merupakan tempat untuk *isopropyl alcohol* diletakkan. Alkohol (jenis *absolute IPA 99,99 %*) di sini digunakan untuk pembungkus partikel agar ukurannya relatif sama. Diusahakan pada *alcohol cartridge* steril dari udara yang tidak akan diteliti agar alat fokus ke udara yang diteliti dan tidak terpengaruh udara lainnya yang memungkinkan memiliki ukuran partikel lebih dari ukuran nanometer (TSI Incorporated, 2013).



Prinsip kerja dari P-Trak ini adalah partikel akan dideteksi dan dipompa masuk ke probe melalui *sampling hose*. Di dalam alat ini terdapat tabung yang berisi alkohol yang berfungsi sebagai pembungkus partikel agar memiliki ukuran yang relatif sama. Kemudian akan terjadi kondensasi karena perubahan suhu. Partikel akan dilewatkan pada sinar laser yang kemudian dideteksi oleh detektor (TSI Incorporated, 2013).



**Halaman ini sengaja dikosongkan**



## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari sampai dengan bulan Februari 2018 bertempat di *workshop* pribadi Perum Mangliawan Permai blok B100, Malang dan Laboratorium Air Quality and Astro Imaging Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur.

### 3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan di dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

#### Alat :

1. Lima buah knalpot sepeda motor dengan jenis yang berbeda (Tabel 3).
2. P-Trak *Ultrafine Particle Counter* model 8525 untuk mengukur PM<sub>0,1</sub> ukuran  $\leq 0,1 \mu\text{m}$  (0,02  $\mu\text{m}$  hingga 1  $\mu\text{m}$ ), rentang konsentrasi 0 hingga  $5 \times 10^5$  particles/cm<sup>3</sup>.
3. Termokopel tipe-K. Termokopel tipe ini memiliki temperatur kerja -40°C sampai +333°C dan memiliki sensitivitas 40.6  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

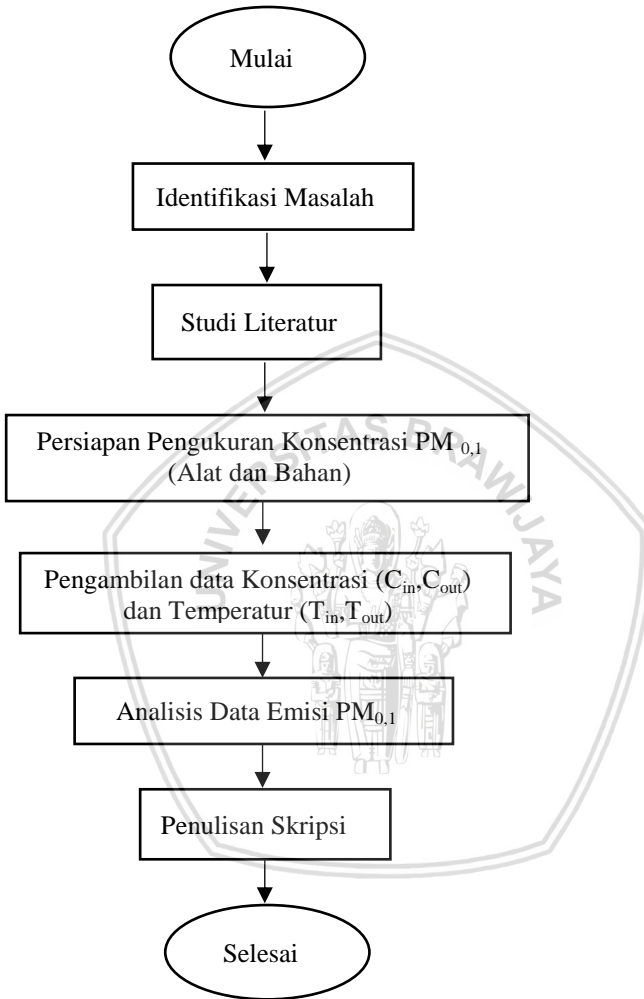
#### Bahan :

1. Satu sepeda motor *matic*

**Tabel 3.** Jenis kendaraan dan bahan knalpot

Knalpot	Jumlah step leher angsa	Compartment
<b>Knalpot 1</b>	2	3
<b>Knalpot 2</b>	2	3
<b>Knalpot 3</b>	2	3
<b>Knalpot 4</b>	3	3
<b>Knalpot 5</b>	2	3

### 3.3 Diagram Alur Penelitian



**Gambar 3.1** Diagram Alur Penelitian

### 3.3.1 Persiapan Alat untuk Pengukuran $PM_{0,1}$

Peralatan yang akan digunakan disiapkan terlebih dahulu antara lain *P-trak Ultrafine Particle Counter Model 8525*, satu jenis sepeda motor, termometer digital, lima jenis knalpot sepeda motor yang berbeda-beda, kunci L, leher angsa dan kunci ring. Leher angsa dipasang pada knalpot sepeda motor karena perbedaan jenis sepeda motor dan knalpot sepeda motor. Knalpot sepeda motor tentunya dipasang pada sepeda motor terlebih dahulu dengan menggunakan kunci L dan kunci ring. Termometer digital dengan sensor jenis termokopel tipe K dipasang pada knalpot sepeda motor.

### 3.3.2 Pengukuran Konsentrasi $PM_{0,1}$

Pengukuran konsentrasi diawali dengan mengkalibrasi P-Trak terlebih dahulu. Cara mengkalibrasi P-Trak *Ultrafine Particle Counter Model 8525* adalah tabung filtrasi diletakkan pada penghubung pipa *probe* di mana partikel menunjukkan nol yang berarti tidak ada partikel. *Probe* dipasang pada *particulate counter* yang mana *probe* berfungsi untuk menarik masuk sampel udara yang mengandung partikel *ultrafine*. Konsentrasi  $PM_{0,1}$  sebelum ( $C_{input}$ ) dan setelah ( $C_{output}$ ) melewati knalpot diukur selama 30 menit.



**Gambar 3. 2** Skema Penelitian

### 3.3.3 Pengukuran Temperatur

Pengukuran temperatur dilakukan dengan merekatkan termometer digital pada knalpot sepeda motor. Suhu yang diukur dengan termometer digital yaitu pada setiap *compartment* yang ada pada knalpot sepeda motor. Kemudian dicatat suhu yang tertera pada *display* termometer digital selama 30 menit sehingga terdapat 6 data suhu *compartment* knalpot.

### 3.3.4 Analisis Data Emisi PM<sub>0,1</sub>

Data yang diperoleh pada penelitian ini berupa data kuantitatif yang diperoleh dari P-Trak *Ultrafine Particulate Counter*. Setiap data pengukuran dieliminasi konsentrasi partikel *ultrafine* yang membuat anomali pada grafik. Kemudian menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi konsentrasi partikel PM<sub>0,1</sub> sesuai dengan tujuan penelitian. Data yang telah diperoleh pada penelitian diolah dalam grafik dan dicari hubungan konsentrasi partikulat dengan waktu, konsentrasi partikulat dengan temperatur, persentase pengurangan emisi dengan temperatur dan efisiensi knalpot sebagai hasil akhir yang diperoleh berdasarkan grafik. Hasilnya dianalisis dengan membandingkan konsentrasi PM<sub>0,1</sub> sebelum dan sesudah melewati knalpot (Persamaan 3.1).

$$PK = 100\% - \left( \left( \frac{C_{output}}{C_{input}} \right) \times 100\% \right) \quad (3.1)$$

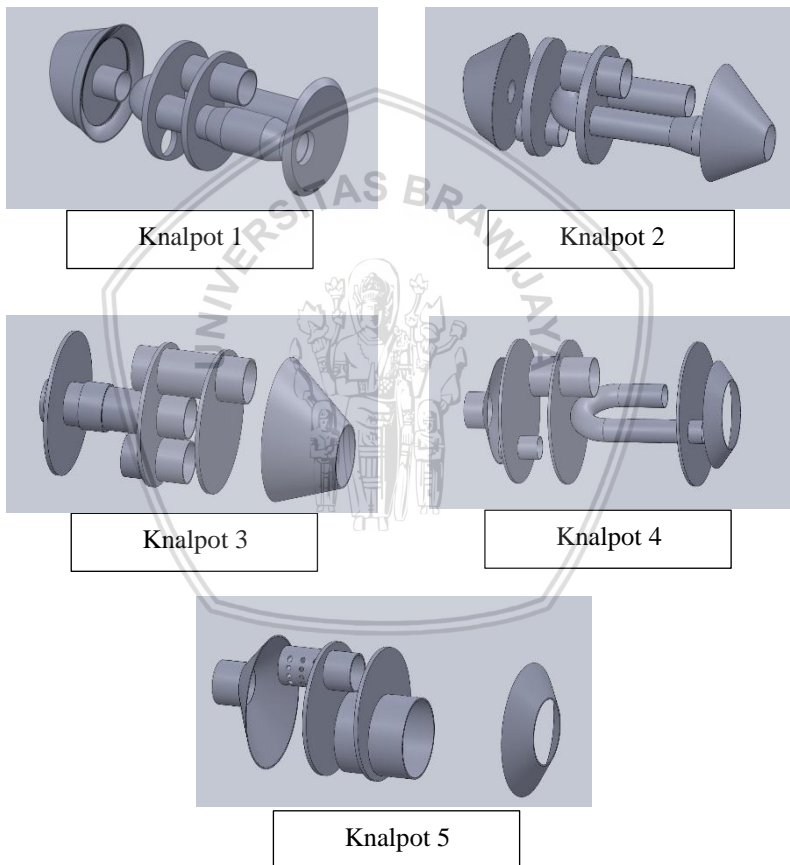
*Keterangan:*

PK = Pengurangan Konsentrasi

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Konstruksi Knalpot

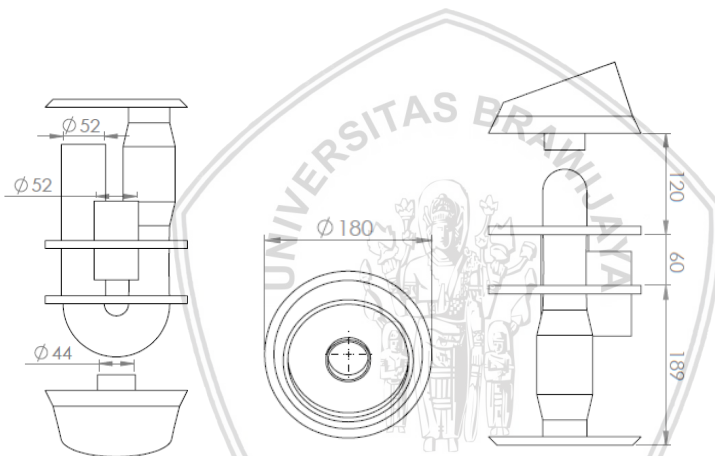
Berikut ini pada Gambar 4.1 terdapat jenis konstruksi knalpot yang berbeda dari jenis knalpot yang berbeda pula. Gambar 4.1 berikut menginterpretasikan manipulasi aliran udara pada setiap knalpot yang diuji.



**Gambar 4.1** Konstruksi knalpot dengan jenis yang berbeda

Pada penelitian ini, penulis menganalisis apakah konstruksi knalpot mempengaruhi jumlah partikulat yang melewati knalpot atau tidak. Pembakaran yang terjadi pada mesin kendaraan sepeda motor akan terurai menjadi bentuk partikulat di mana partikulat tersebut akan melewati *perforated pipes* yang ada di dalam knalpot atau *silencer* untuk selanjutnya akan dibuang atau dilepas ke udara melalui *muffler tip*.

Berikut ini penjelasan mengenai konstruksi setiap knalpot beserta dimensinya. Namun, gambar konstruksi pada bab ini juga terdapat pada lampiran di mana ukuran gambar dapat terlihat dengan jelas.



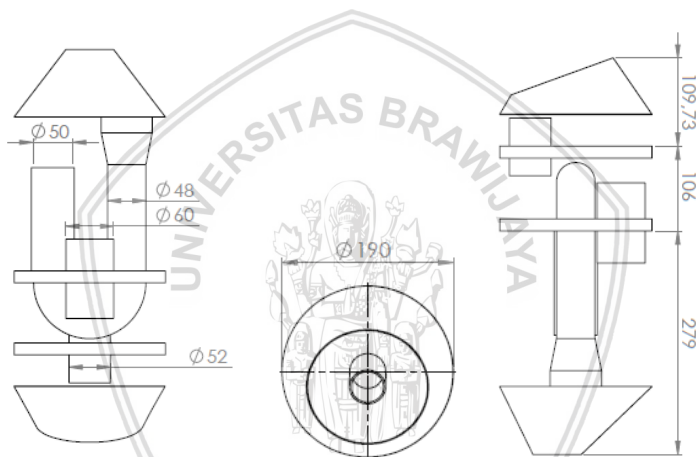
**Gambar 4.2** Skema Konstruksi Knalpot 1

Skema konstruksi knalpot 1 pada gambar di atas terdapat beberapa sisi knalpot. Sisi kiri merupakan konstruksi knalpot tampak atas, sisi tengah merupakan konstruksi knalpot tampak depan, dan sisi kanan merupakan konstruksi knalpot tampak samping. Ketiga gambar di atas menjelaskan beberapa jarak antara *compartment* yang ada di dalam knalpot dan ukuran diameter pada pipa besi yang berfungsi sebagai wadah aliran partikel. Ukuran panjang *silencer* knalpot 1 adalah sebesar 36 cm. Kemudian ukuran *compartment* 1 adalah 18 cm. Selanjutnya adapun ukuran *compartment* 2 adalah sebesar 6 cm. Ukuran *compartment* 3 adalah 12 cm. Besar diameter pipa 1 yaitu pada *compartment* 1 sebesar 2,6



cm. Diameter pipa 2 yang ada pada *compartment* 2 sebesar 2,6 cm. Selanjutnya diameter pipa 3 pada *compartment* 1 sebesar 2,6 cm dan diameter pipa 4 pada *muffler tip* sebesar 2,2 cm.

Berdasarkan skema konstruksi knalpot 1 tersebut, partikulat mengalir melalui *exhaust pipe* atau *header* menuju *compartment* 2 dan 3 yang selanjutnya kembali ke *compartment* 1. Setelah itu melalui pipa kedua menuju *compartment* 2. Pipa yang ada di *compartment* 2 akan melanjutkan aliran partikulat menuju *compartment* 3. Pada *compartment* 3 partikulat melalui *muffler tip* yang selanjutnya partikulat akan dibuang ke udara.

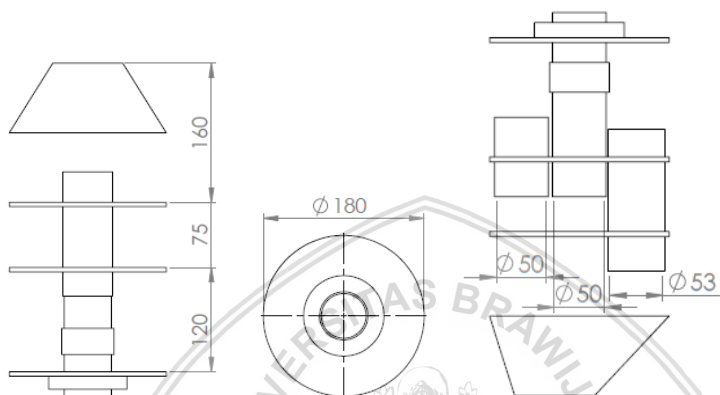


**Gambar 4.3** Skema Konstruksi Knalpot 2

Ukuran panjang *silencer* knalpot 2 seperti yang ada pada gambar di atas adalah sebesar 48,5 cm. Panjang *compartment* 1 adalah sebesar 27,9 cm. Panjang *compartment* sebesar 10,6 cm. Panjang *compartment* 3 sebesar 10 cm. Kemudian besar diameter pipa 1 berukuran 2,5 cm. Sedangkan Diameter pipa 2 berukuran 3 cm dan diameter pipa 3 berukuran 2,4 cm. Serta besar diameter pipa 4 berukuran 2,6 cm.

Berdasarkan skema konstruksi knalpot 2 pada Gambar 4.3 di atas, partikulat mengalir melalui *exhausted pipe* terlebih dahulu kemudian menuju pipa yang melewati *compartment* 1 dilanjutkan

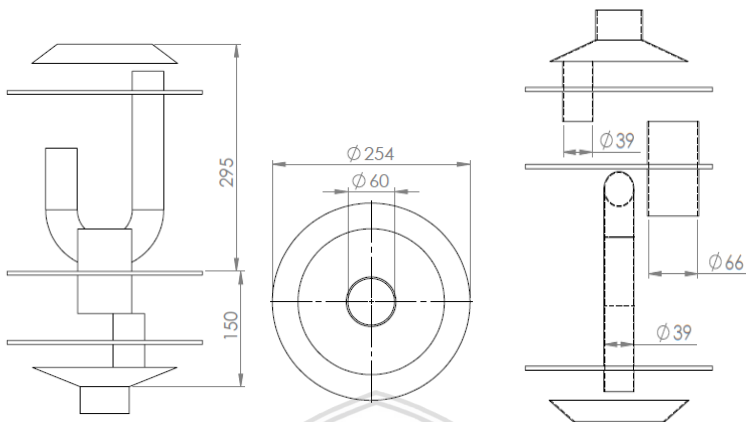
ke *compartment* 2 dan kembali ke *compartment* 1. Setelah itu melalui pipa kecil menuju *compartment* 2 dan melalui pipa kecil yang menuju *compartment* 3 dan akan dibuang ke udara melalui *muffler tip*.



**Gambar 4.4** Skema Konstruksi Knalpot 3

Ukuran panjang *silencer* knalpot 3 pada Gambar 4.4 di atas adalah sebesar 35,5 cm. Panjang *compartment* 1 adalah 16 cm. Panjang *compartment* 2 adalah 7,5 cm. Panjang *compartment* 3 adalah 12 cm. Ukuran diameter pipa 1 adalah 2,65 cm, diameter pipa 2 adalah 2,5 cm, dan diameter pipa 3 juga berukuran 2,5 cm.

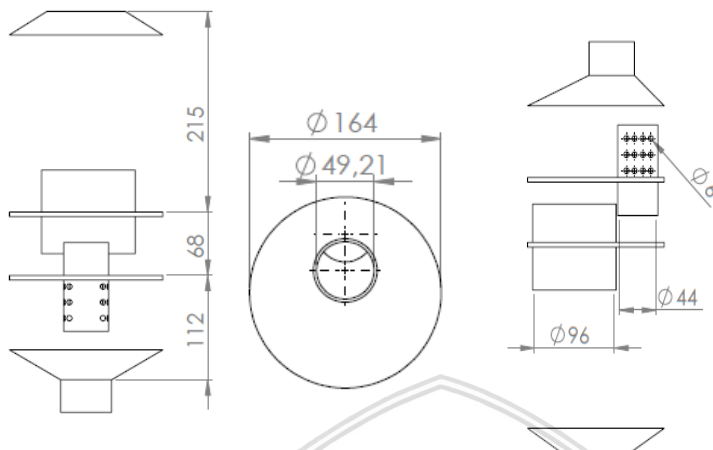
Berdasarkan skema konstruksi knalpot pada Gambar 4.4 di atas, partikulat mengalir melalui *exhausted pipe* dari mesin kendaraan bermotor kemudian menuju *compartment* 1. Pada *compartment* 1 partikulat mengalir melalui pipa besi yang akan diteruskan menuju *compartment* 3. Kemudian melalui pipa dari *compartment* 3 menuju *compartment* 2. Selanjutnya, dari *compartment* 2 melalui *muffler tip* di mana partikulat akan dibuang ke udara.



**Gambar 4.5** Skema Konstruksi Knapot 4

Ukuran panjang *silencer* knalpot 4 adalah sebesar 44,5 cm. Ukuran *compartment* 1 adalah 29,5 cm. Ukuran *compartment* 2 adalah 15 cm. Ukuran diameter pipa 1 sebesar 1,95 cm. Ukuran diameter pipa 2 sebesar 3,3 cm. Ukuran diameter pipa 3 sebesar 1,95 cm. Pada knalpot 4 ini *compartment* 3 menyerupai ruangan tertutup.

Berdasarkan skema konstruksi knalpot 4 pada Gambar 4.5 di atas, partikulat mengalir melalui *exhausted pipe* menuju pipa yang berada di *compartment* 1 dan diteruskan menuju pipa kecil menuju *compartment* 2 yang selanjutnya akan diteruskan menuju *compartment* 3 di mana *compartment* tersebut seperti ruangan tertutup. Kemudian selanjutnya diteruskan menuju *muffler tip* dan partikulat dilepas ke udara.



**Gambar 4.6** Skema Konstruksi Knalpot 5

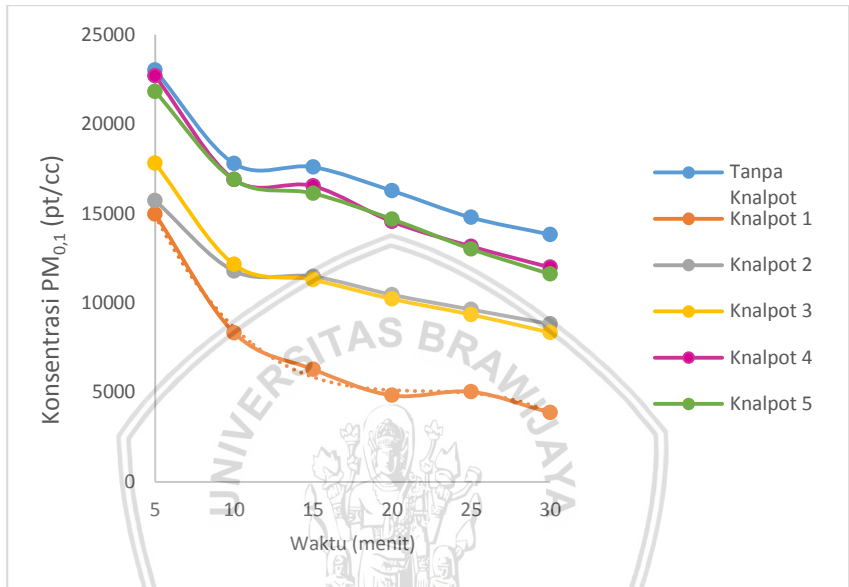
Ukuran panjang *silencer* knalpot 5 Gambar 4.6 di atas adalah 39,5 cm. Ukuran *compartment* 1 adalah 21,5 cm. Ukuran *compartment* 2 adalah 6,8 cm. Ukuran *compartment* 3 adalah 11,2 cm. Ukuran diameter pipa 1 adalah 4,8 cm. Ukuran diameter pipa 2 adalah 2,2 cm.

Pada knalpot 5, partikulat dari *exhausted pipe* bergerak menuju *compartment* 1 dan melalui pipa kecil menuju *compartment* 2. Selanjutnya melalui pipa kecil menuju *compartment* 3 diteruskan melalui *perforated pipe* dan partikel dibuang ke udara melalui *muffler tip*.

Lima jenis knalpot yang digunakan dalam penelitian ini memiliki konstruksi yang berbeda-beda. Hal ini akan mempengaruhi jumlah gas buang yang dikeluarkan oleh knalpot dari hasil pembakaran pada mesin. Pipa dalam *muffler* berfungsi untuk menyaring gas buang agar gas yang dikeluarkan ramah lingkungan. Gas buang yang disaring tentu seperti karbonmonoksida (CO), hidrokarbon (HC), dan nitrogen oksida (NOx). Kemudian dari lima jenis konstruksi yang berbeda tersebut akan dianalisis untuk menemukan knalpot yang lebih efisien dan menghasilkan gas buang yang lebih ramah lingkungan.

#### 4.2 Konsentrasi $PM_{0,1}$

Pengukuran jumlah partikulat  $PM_{0,1}$  yang telah dilakukan menghasilkan data pada grafik sebagai berikut (Gambar 4.7) yang dihubungkan dengan waktu pengambilan jumlah partikulat.



**Gambar 4.7** Grafik waktu terhadap konsentrasi  $PM_{0,1}$

Pengambilan data jumlah partikulat yang dilepas ke udara dari lima jenis knalpot sepeda motor dipresentasikan pada grafik dengan waktu selama 30 menit pengamatan. Selama waktu 30 menit tersebut setiap 5 menit dilakukan pencatatan data partikulat yang dideteksi oleh alat P-Trak 8525. Sebagai perbandingan hasil data yang telah diperoleh dari lima jenis knalpot yang berbeda tersebut yaitu dengan mengukur partikulat yang dilepas ke udara dari sebuah sepeda motor tanpa knalpot. Sehingga dengan demikian dapat menganalisis knalpot yang lebih efisien untuk mengurangi emisi partikulat  $PM_{0,1}$ .

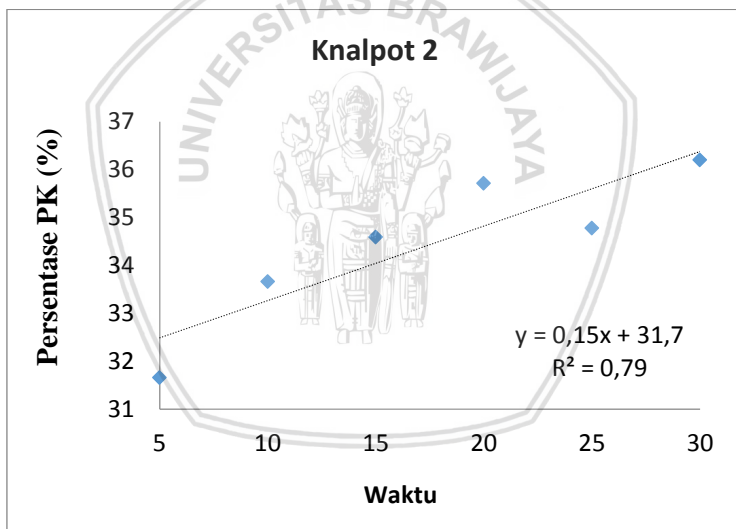
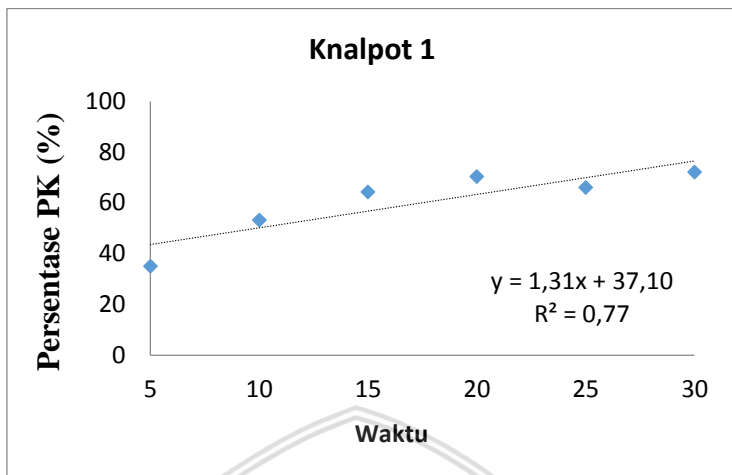
Berdasarkan grafik di atas, terdapat *line* yang menandai kelima knalpot dan tanpa knalpot. Menit ke 5 menuju menit ke 10 *line* tanpa knalpot, knalpot 1, knalpot 2, knalpot 3, knalpot 4, dan

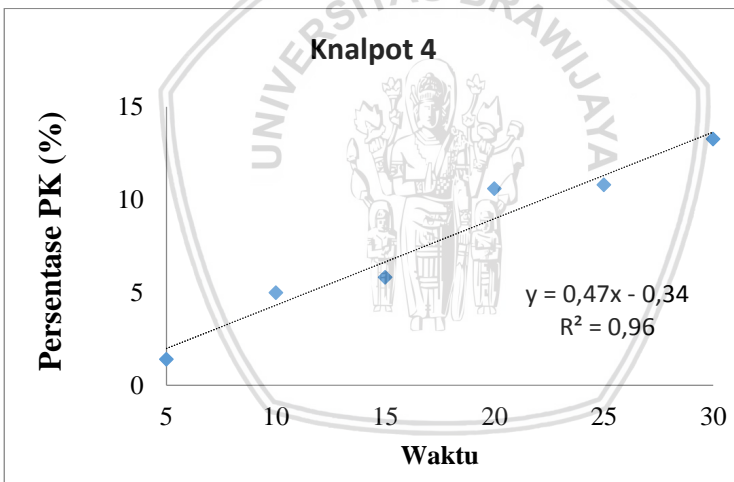
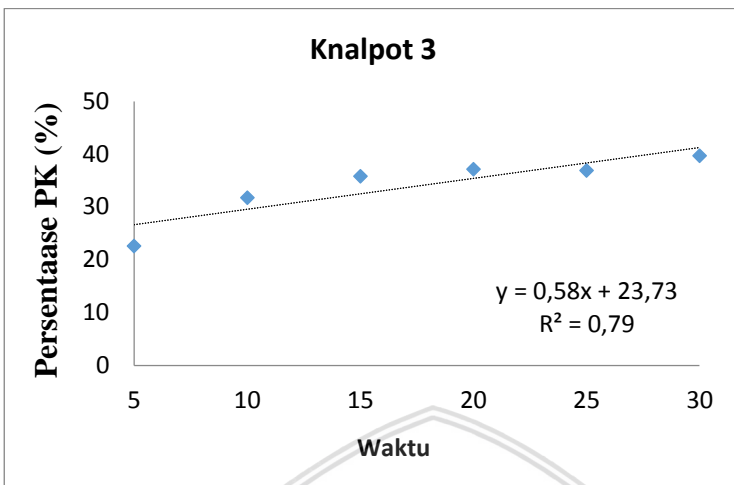
knalpot 5 mengalami penurunan. Selanjutnya menit ke 10 menuju menit ke 15, *line* tanpa knalpot dan knalpot 4 mengalami sedikit kenaikan, knalpot 2, knalpot 3 dan knalpot 5 mengalami sedikit penurunan kecuali knalpot 1. Kemudian menit ke 15 menuju menit ke 20 *line* tanpa knalpot, knalpot 1, knalpot 2, knalpot 3, knalpot 4, dan knalpot 5 mengalami penurunan. Menit 20 menuju menit ke 25 *line* tanpa knalpot, knalpot 2, knalpot 3, knalpot 4 dan knalpot 5 menurun, sedangkan *line* knalpot 1 sedikit naik. Menit yang terakhir, yaitu 25 menuju menit ke 30 *line* tanpa knalpot, knalpot 1, knalpot 2, knalpot 3, knalpot 4, dan knalpot 5 menurun.

Grafik tersebut menunjukkan posisi *trendline* setiap knalpot dan tanpa knalpot pada waktu dan dengan jumlah partikulat tertentu. Lamanya waktu penelitian membuat temperatur knalpot meningkat. Terlihat pada grafik, partikulat yang dilepas ke udara tanpa adanya knalpot tentu menghasilkan partikulat dalam jumlah yang banyak. Berbeda dengan emisi yang dihasilkan dari sebuah sepeda motor dengan adanya knalpot. Namun, dari setiap knalpot tersebut terdapat knalpot yang lebih efisien dalam hal pengurangan  $PM_{0,1}$ . Kemudian selanjutnya dengan hasil jumlah partikulat terbanyak kedua setelah tanpa knalpot yaitu knalpot 4, jumlah partikulat terbanyak ketiga yaitu knalpot 5, selanjutnya knalpot 3, dan terakhir adalah knalpot 2. Sedangkan knalpot 1 menghasilkan jumlah partikulat yang lebih sedikit. Sehingga, knalpot 1 dalam hal lamanya waktu penelitian mengalami penurunan konsentrasi.

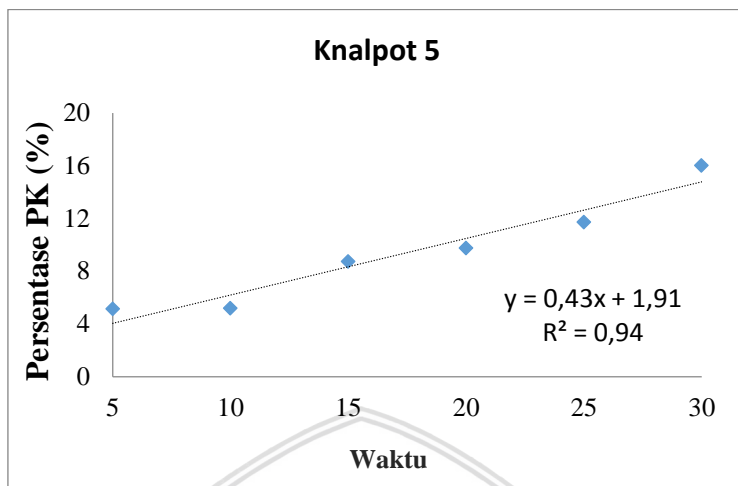
#### 4.3 Persentase Pengurangan Konsentrasi $PM_{0,1}$

Hubungan waktu dengan persentase pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$  pada tiap-tiap knalpot menunjukkan adanya perbedaan. Untuk meninjau pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$  dapat dilihat grafik berikut terlebih dahulu.







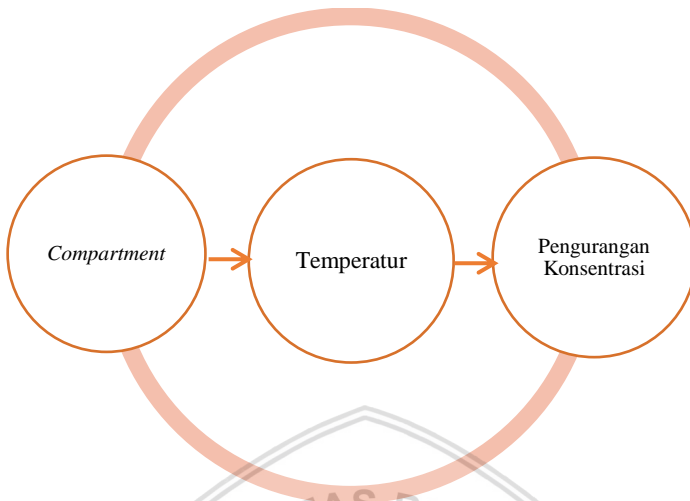


**Gambar 4.8** Grafik waktu terhadap persentase pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$

Grafik di atas merupakan hasil yang menunjukkan hubungan waktu terhadap persentase pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$ . Berdasarkan grafik di atas tersebut, penambahan waktu membuat persentase pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$  semakin meningkat untuk tiap-tiap knalpot. Namun, pada menit tertentu beberapa knalpot mengalami penurunan dan kenaikan yang signifikan. Hal ini disebabkan karena konstruksi yang berbeda pada setiap knalpot.

#### 4.4 Pembahasan

Penelitian ini menganalisis konstruksi knalpot dalam mengurangi konsentrasi partikel jenis  $PM_{0,1}$  yang dilepas ke udara dari sebuah sepeda motor. Seluruh data yang telah diperoleh dan diolah menghasilkan grafik hubungan antara waktu dan konsentrasi partikulat yang menunjukkan bahwa knalpot 1 merupakan knalpot yang paling efisien untuk mengurangi  $PM_{0,1}$  (Gambar 4.7). Jumlah partikulat yang diemisikan lewat knalpot 1 juga lebih rendah atau lebih sedikit dibandingkan dengan knalpot lain. Hasil tersebut jauh lebih rendah dibandingkan dengan tanpa menggunakan knalpot.



**Gambar 4.9** Diagram konsep pembahasan

Perbedaan konsentrasi tersebut dapat diakibatkan oleh beberapa faktor yang mempengaruhi pengurangan konsentrasi, seperti model *compartment* dan faktor pengukuran (Gambar 4.9). Berdasarkan data yang diperoleh, hasil yang terbaik yaitu knalpot 1, didukung oleh *compartment* yang memiliki luas sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya pada sub bab 4.1. Luas *compartment* tersebut menandakan seberapa besar volume *compartment*nya. Sehingga hal ini juga akan mempengaruhi temperatur di dalam knalpot 1 tersebut.

*Compartment* 1 merupakan daerah penampungan emisi terpanas ( $H$ ) di dalam sistem pembuangan emisi sepeda motor. Semakin luas permukaan *compartment* 1 mengakibatkan laju perpindahan panas akan semakin besar karena semakin besar area pemanasan yang dilalui energi kalor. Semakin besar energi kalor menunjukkan kenaikan panas yang semakin tinggi. Secara fisika, temperatur memiliki hubungan dengan energi kalor yang dinyatakan dalam rumus seperti berikut (Persamaan 4.1).

$$H = k \cdot A \cdot t \frac{\Delta T}{L} \quad (4.1)$$

*Keterangan :*

$H$  : laju perpindahan panas (W)  
 $k$  : konduktivitas termal (J/m°C)  
 $A$  : luas penampang (m<sup>2</sup>)  
 $\Delta T$  : perubahan temperatur (°C)  
 $L$  : panjang (m)  
 $t$  : selang waktu (s)

Persamaan di atas merupakan persamaan perpindahan panas secara konduksi yang dipengaruhi oleh temperatur. Di sisi lain, besar energi kalor akan sebanding dengan kenaikan temperatur. Semakin tinggi energi kalor ( $Q$ ) maka semakin besar energi tersebut dapat mempengaruhi temperatur ( $T$ ) di dalam *compartment* knalpot. *Compartment* knalpot dinyatakan dengan  $A$  sebagai luas penampang dan  $L$  sebagai panjang dari *compartment* tersebut. Semakin besar dimensi suatu *compartment* maka energi kalor yang dilepaskan ke dalam *compartment* membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan energi kalor yang dilepaskan untuk suatu *compartment* dengan dimensi yang lebih kecil. Akibatnya, semakin besar luas penampang sebuah *compartment* mengakibatkan semakin besar energi kalor yang dilepas. Kalor dalam knalpot mempengaruhi jumlah konsentrasi partikulat yang dilepas ke udara. Hal ini terjadi karena perbedaan nilai “ $Q$ ” memiliki pengaruh yang sangat besar. Semakin besar perbandingan nilai “ $Q_{input}$ ” dengan “ $Q_{output}$ ” membuktikan semakin efisien suatu knalpot tersebut. Dengan kata lain, apabila kita mendinginkan knalpot atau membuat temperatur knalpot rendah, maka jumlah konsentrasi PM<sub>0,1</sub> akan semakin tinggi sehingga persentase pengurangan konsentrasi yang dihasilkan rendah.

Selain perpindahan panas secara konduksi, terdapat perpindahan panas secara konveksi yang dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut (Persamaan 4. 2).

$$H = h \cdot A \Delta T \quad (4.2)$$

*Keterangan :*

$H$  : laju perpindahan panas (W)

$h$  : koefisien konveksi ( $\text{W/m}^2\text{°C}$ )

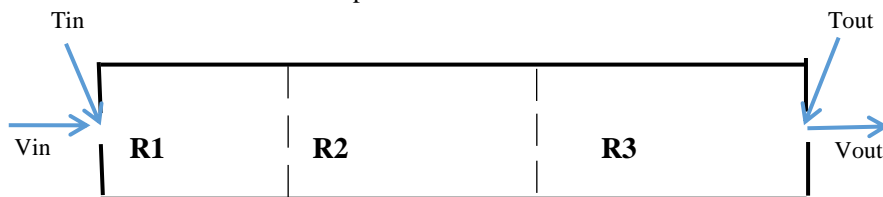
$A$  : luas penampang ( $\text{m}^2$ )

$\Delta T$  : perubahan temperatur ( $\text{°C}$ )

Perbedaan nilai kalor akibat perbedaan konstruksi dan manipulasi udara yang terdapat di tiap-tiap knalpot akan mengakibatkan terjadinya perbedaan nilai kalor yang digunakan untuk mereduksi konsentrasi partikulat. Temperatur dimungkinkan memiliki peranan untuk penurunan konsentrasi  $\text{PM}_{0,1}$  (Wardoyo dkk, 2017). Apabila mengamati kembali grafik hubungan waktu dengan konsentrasi (Gambar 4.7) dan perubahan temperatur terhadap konsentrasi (Gambar 4.11) di mana secara tidak langsung waktu berbanding lurus dengan temperatur, diketahui bahwa penurunan konsentrasi  $\text{PM}_{0,1}$  dipengaruhi oleh perubahan temperatur. Sebagaimana pada knalpot 1 yang merupakan knalpot yang paling efisien dibandingkan dengan knalpot yang lainnya dalam hal penurunan konsentrasi  $\text{PM}_{0,1}$ , knalpot 1 memiliki ukuran *compartment* 1 sebesar 18 cm, ukuran *compartment* 2 dan 3 adalah 6 cm dan 12 cm. Sehingga total panjang *compartment* knalpot 1 sebesar 36 cm. Desain pipa dalam *compartment* juga memenuhi *compartment* knalpot 1 tersebut. Sehingga pipa pada *compartment* juga mempengaruhi *flowrate* untuk temperatur tertentu.

Penelitian ini dilakukan sebanyak tiga kali pengambilan sampel di mana data diolah dan dihitung nilai rata-ratanya. Kelima jenis knalpot yang berbeda tentu akan memiliki desain manipulasi aliran udara yang berbeda meskipun memiliki jumlah *compartment* yang sama di dalam setiap knalpot ( $n = 3$ ). Knalpot yang memiliki karakteristik manipulasi udara (Gambar 4.10) yang berbeda ini dianalisis sistem pipa di dalam *compartment*, temperatur *compartment* pertama (ruang 1) atau  $T_{in}$ , temperatur *output* emisi atau  $T_{out}$ , dan beberapa faktor pengukuran (Gambar 4.9).

### Sistem Pipa Manipulasi Aliran Udara

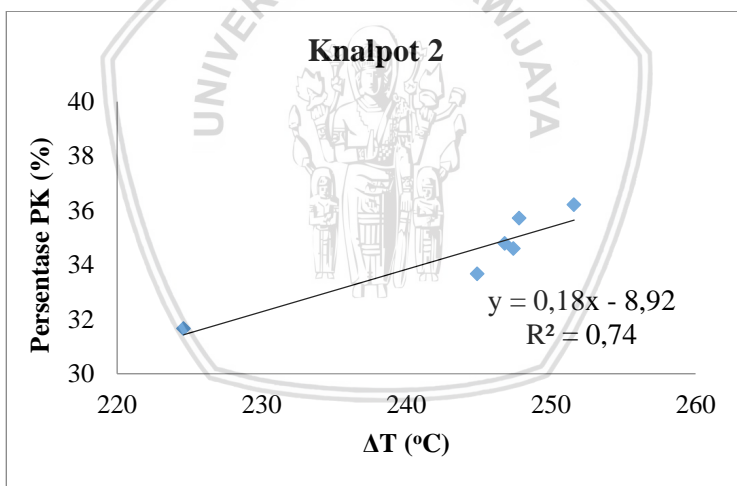
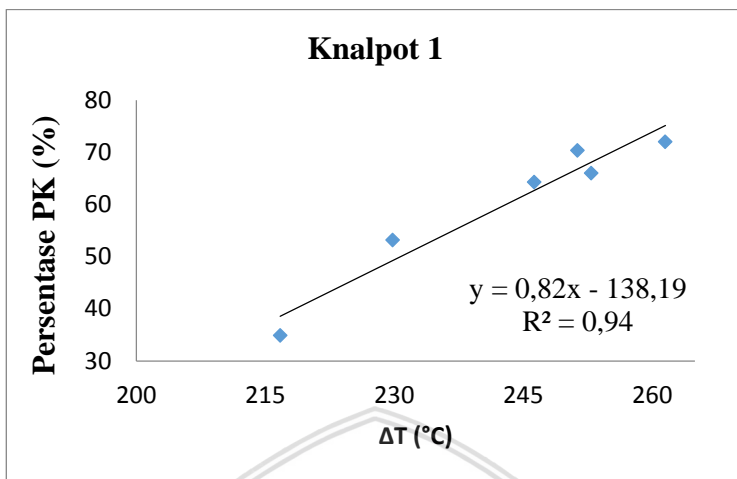


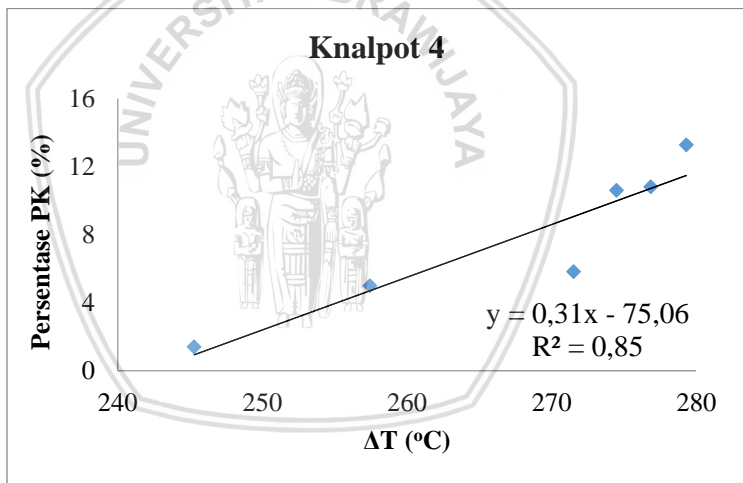
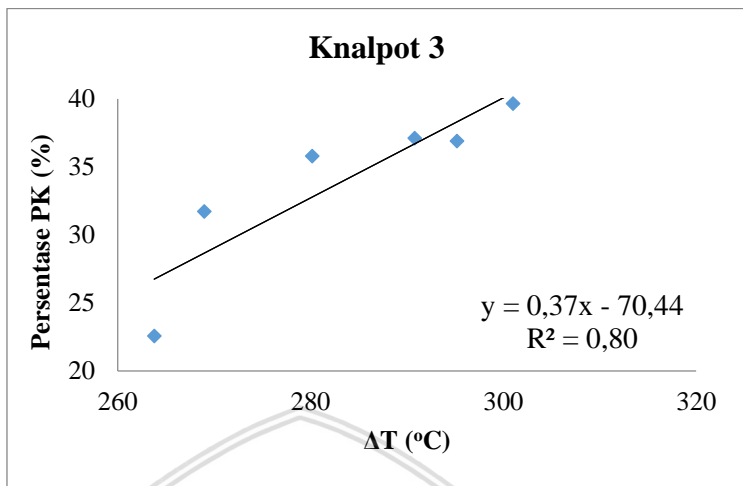
**Gambar 4.10** Skema Sistem Manipulasi Udara

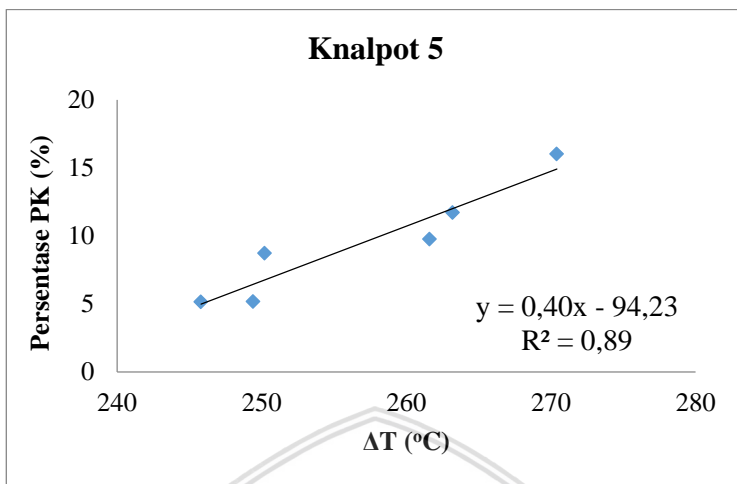
Gambar di atas menjelaskan bahwa dari sistem knalpot yang ada memiliki urutan *compartment* yang sama, yaitu *compartment 1*, *compartment 2*, dan *compartment 3*. Sebelum partikel melewati *compartment* tersebut, partikel memasuki fase *input* (R0) dan setelah melewati *compartment*, partikel memasuki fase *output* (R4). Namun, dalam hal ini, sistem pipa dalam knalpot berbeda sehingga adanya manipulasi aliran udara yang berbeda pula. Sehingga, aliran partikel tidak selalu berurutan dari *compartment 1*, *compartment 2*, dan *compartment 3* tetapi bergantung pada sistem pipa yang ada dalam tiap-tiap knalpot. Knalpot yang digunakan masing-masing memiliki jumlah *compartment* yang sama tetapi memiliki dimensi yang berbeda.

Setelah mengetahui dimensi knalpot yang berbeda-beda, akan ada perubahan fisis di dalam knalpot. Perubahan fisis tersebut memungkinkan terjadinya konduksi, konveksi, maupun radiasi. Perbedaan nilai konsentrasi dan bentuk pipa di dalam knalpot juga dapat mempengaruhi energi yang dihasilkan. Sehingga jika nilai konsentrasi dan dimensi berbeda, maka nilai temperatur pun berbeda kemudian akan mempengaruhi hasil akhir nilai pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$ .

Hubungan antara perubahan temperatur dengan persentase pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$  pada masing-masing knalpot dipresentasikan dalam grafik berikut ini. Melalui grafik, dapat dengan mudah menyimpulkan bagaimana keadaan konsentrasi saat temperatur semakin meningkat.







**Gambar 4.11** Grafik Hubungan  $\Delta T$  dan Persentase PK (%)

Kemudian selanjutnya dari grafik pada Gambar 4.11 di atas dapat dengan mudah melihat perolehan konsentrasi dengan perubahan temperaturnya. Grafik hubungan tersebut tersedia untuk knalpot 1 sampai knalpot 5. Pada dasarnya memiliki kesimpulan yang sama jika perubahan temperatur ( $T_{out} - T_{in}$ ) semakin tinggi, maka persentase pengurangan konsentrasi pun tinggi. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa terdapat korelasi yang cukup kuat antara perubahan temperatur dengan pengurangan konsentrasi ( $R > 0,85$ ).

Setelah mengetahui hubungan perubahan temperatur dengan penurunan konsenrasi  $PM_{0,1}$  setiap knalpot, maka berikut ini merupakan grafik hubungan pengurangan konsentrasi dan temperatur yang mewakili salah satu knalpot dengan perolehan pengurangan konsentrasi terbaik, yaitu knalpot 1.

Grafik pada Gambar 4.11 menjelaskan bahwa rendahnya temperatur menghasilkan persentase pengurangan konsentrasi partikulat yang rendah. Sedangkan apabila temperatur meningkat, persentase pengurangan konsentrasi partikulat semakin tinggi. Grafik dari penelitian di atas memiliki hasil yang sama mengenai pengaruh temperatur dan konsentrasi dalam penelitian yang berbeda seperti yang dilakukan oleh Peng Geng dalam jurnalnya (Geng dkk, 2015).



Partikel yang mengalir dalam knalpot melalui sistem perpipaan mengalami proses yang sedemikian rupa mengikuti bentuk pipa yg ada untuk melewati tiap *compartment*. Jika ukuran partikel besar, maka alat pencacah partikel yaitu P-Trak model 8525 tidak dapat menghitung atau dengan kata lain, ukuran partikel yang besar tidak dapat dicacah oleh alat P-Trak model 8525. Gambar 4.7 membuktikan bahwa partikulat yang dihasilkan oleh sebuah sepeda motor tanpa knalpot sangat tidak baik untuk lingkungan. Akan tetapi sebuah sepeda motor dengan knalpot pun dapat diseleksi lagi dalam hal yang mampu menghasilkan partikulat dalam jumlah sedikit untuk dilepas ke udara sehingga baik untuk lingkungan.

Hasil interpretasi pengurangan konsentrasi partikel  $PM_{0,1}$  menunjukkan bahwa terdapat kecenderungan penurunan konsentrasi seiring dengan semakin lama waktu pengukuran. Di sisi lain, semakin lama waktu pengukuran mengindikasikan adanya kenaikan temperatur. Hal ini menunjukkan adanya hubungan antara temperatur terhadap pengurangan partikel  $PM_{0,1}$ . Gambar 4.11 menunjukkan bahwa kenaikan temperatur mengakibatkan rendahnya pengurangan partikel  $PM_{0,1}$ . Nilai koefisien determinasi hubungan antara perubahan temperatur dengan pengurangan  $PM_{0,1}$  knalpot 1 adalah  $R^2 = 0,94$ . Koefisien determinasi merupakan seberapa besar ketepatan dalam penelitian. Jika nilai mendekati 1 atau sama dengan 1 merupakan hasil yang baik dalam penelitian tersebut.

Saat dilakukan penelitian, proses pemasangan knalpot pada sepeda motor harus rapat karena jika tidak rapat akan mempengaruhi jumlah partikulat yang dilepas ke udara yang biasa disebut dengan kebocoran (*heat loss*). Bagian motor yang harus rapat pemasangannya tersebut adalah *header*. Kemudian knalpot dipasang termokopel tipe K di masing-masing ujung knalpot untuk mengetahui temperatur *input* dan *output*. Temperatur *input* dan *output* setiap knalpot tentu memiliki perbedaan dikarenakan pemanasan yang dialami oleh bahan dasar dari knalpot itu sendiri. Alat penghitung jumlah partikulat P-Trak tipe 8525 diletakkan 40 cm di belakang knalpot. Kemudian sepeda motor dinyalakan dan data yang ada pada monitor P-Trak dapat dicatat mulai menit ke 5 sampai 30 dengan interval 5 menit per *sampling*. Penelitian ini dilakukan pada tempat yang tidak dilalui banyak kendaraan

sehingga hanya ada knalpot yang akan diuji dan sepeda motor yang digunakan. Meskipun ruang pengukuran telah dilakukan dengan kondisi *ambient* yang terkontrol, adanya beberapa kesalahan pengukuran (*systematic error*) dapat mempengaruhi hasil dan memberikan sedikit anomali. Pembacaan termometer yang kurang teliti, pembacaan konsentrasi *ultrafine particle* pada P-Trak, dan jarak *probe* yang mungkin kurang presisi memungkinkan terjadinya anomali di dalam hasil pengukuran.



## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa beberapa knalpot terhadap konsentrasi  $PM_{0,1}$  disimpulkan bahwa:

1. Pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$  dipengaruhi oleh adanya pengaruh dari konstruksi dalam knalpot.
2. Terdapat korelasi antara konstruksi knalpot dengan kenaikan temperatur terhadap pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$ .
3. Konstruksi knalpot terbaik dalam hal pengurangan konsentrasi  $PM_{0,1}$  terdapat pada knalpot 1, dan konstruksi terburuk diperoleh pada knalpot 4.

### 5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan penelitian laju aliran (*flowrate*) pada *compartment* knalpot sepeda motor, menganalisis bahan dasar knalpot sepeda motor, dan mengukur temperatur setiap *compartment* knalpot sepeda motor.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**



## DAFTAR PUSTAKA

- Aleman, M., Wahlström, J., & Olofsson, U. (2018). On the Influence of Car Brake System Parameters on Particulate Matter Emissions. *Wear*, 396–397(July 2017), 67–74.
- Alfiah, T. (2009). Particulate Matter (PM). *Itats*, 1–10.
- Asgharian, B., & Price, O. T. (2007). Deposition of Ultrafine (NANO) Particles in the Human Lung. *Inhalation Toxicology*, 19, 1045–1054.
- Bigazzi, A. Y., & Figliozzi, M. A. (2012). Impacts of freeway traffic conditions on in-vehicle exposure to ultrafine particulate matter. *Atmospheric Environment*, 60, 495–503.
- Buchori, L. (2003). *Perpindahan Panas (Heat Transfer)*. Semarang.
- Budiyono, A. (2001). Pencemaran Udara : Dampak Pencemaran Udara Pada Lingkungan. *Berita Dirgantara*, 2(1), 21–27.
- Donahue, N. M. (2018). Green Chemistry. *Air Pollution and Air Quality*, 151–176.
- Fan, Y., Hou, L., & Yan, K. X. (2018). On the density estimation of air pollution in Beijing. *Economics Letters*, 163, 110–113.
- Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., Denier Van Der Gon, H., Facchini, M. C., Fowler, D., Koren, I., Langford, B., Lohmann, U., Nemitz, E., Pandis, S., Riipinen, I., Rudich, Y., Schaap, M., Slowik, J. G., Spracklen, D. V., Vignati, E., Wild, M., Williams, M., Gilardoni, S. (2015). Particulate matter, air quality and climate: Lessons learned and future needs. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(14), 8217–8299.
- Geng, P., Zhang, H., & Yang, S. (2015). Experimental investigation on the combustion and particulate matter (PM) emissions from a port-fuel injection (PFI) gasoline engine fueled with methanol-ultralow sulfur gasoline blends. *Fuel*, 145, 221–227.
- Hart, J. E., Liao, X., Hong, B., Puett, R. C., Yanosky, J. D., Suh, H., Kioumourtzoglou, M., Spiegelman, D., Laden, F. (2015). The association of long-term exposure to PM<sub>2.5</sub> on all-cause mortality in the Nurses ' Health Study and the impact of measurement-error correction. *Environ. Health*, 1–9.
- Ismiyati, Marlita, D., & Saidah, D. (2014). Pencemaran Udara Akibat Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor. *Jurnal*

- Manajemen Transportasi & Logistik (JMTransLog)*, 1(3), 241–248.
- Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 151(2), 362–367.
- Kusminingrum, N., & G, G. (2008). Polusi Udara Akibat Aktivitas Kendaraan Bermotor di Jalan Perkotaan Pulau Jawa dan Bali. *Pusat Litbang Jalan Dan Jembatan*, 13.
- Motorcycle News. (2016). Emission Impossible, What Euro 4 Really Means. <https://www.motorcyclenews.com/news/2016/january>.
- Meriyanto, D. D. (2013). Analisis Panas Pada Knalpot Berbasis Sponge Steel. *Engineer Student Journal*, 5-6.
- National Park Sevice. (2018). Where Does Air Pollution Come From?. <https://www.nps.gov/subjects/air/sources.htm>.
- Pamungkas, S. (2012). Analisis penggunaan model knalpot standar terhadap kinerja mesin 4 langkah 100 cc dan 125 cc. *Engineer Student Journal*. University of Indonesia.
- Pranoto, A. (2012). Efek Perubahan Ukuran Diameter Header Knalpot Terhadap Konsumsi Bahan Bakar dan Akselerasi Pada Sepeda Motor 4 Tak. *Machine Engineer Journal*. IST AKPRIND,1.
- R.D.Ratnani. (2008). Teknik Pengendalian Pencemaran Udara Yang Diakibatkan Oleh Partikel. *Chemical Journal*,4,27–32.
- Sabaliauskas, K., Evansa, G., & Jeonga, C.-H. (2012). Source Identification of Traffic-Related Ultrafine Particles Data Mining Contest. *Procedia Computer Science*, 13, 99–107.
- Sanata, A. (2011). 32 Pengaruh Diameter Pipa Saluran Gas Buang Tipe Straight Throw Muffler Terhadap Unjuk Kerja Motor Bensin Empat Langkah. *Jurnal Rotor*. 4, 32–39.
- Sipahutar, R. (2011). Studi Eksperimental Pengaruh Penggunaan Catalytic Converter Terhadap Emisi Gas Buang Pada Motor Yamaha Rx-King Tahun Pembuatan 2006. *Prosiding Seminar Nasional AVoER ke-3*. (141), 26–27.
- Sitti Maysaroh, Unggul P. Juswono, A. Y. P. W. (2015). Pengaruh Partikel Ultrafine Dalam Asap Kendaraan Bermotor Terhadap Organ Hati Mencit (Mus Musculus) Berdasarkan Pengamatan Mikroskopis. *Physics Student Journal*, 1–5.

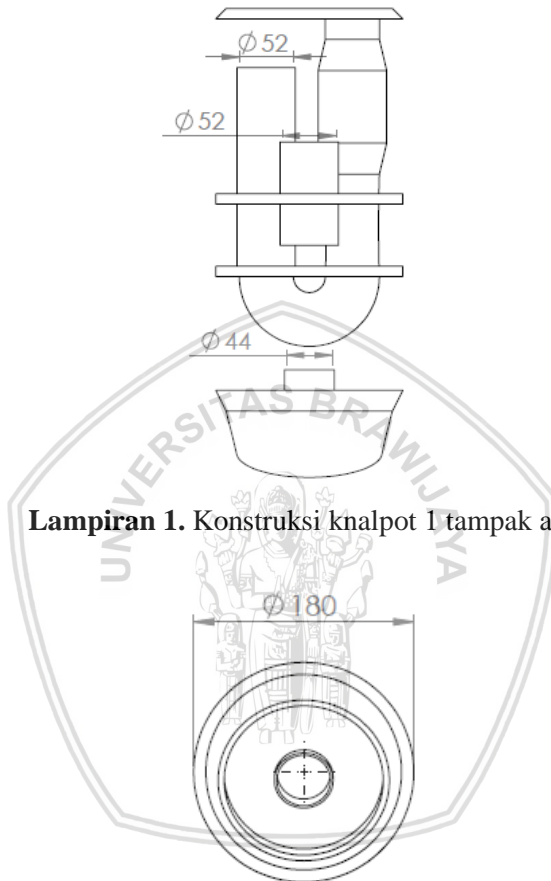
- Sugiarti. (2009). Gas Pencemar Udara Dan Pengaruhnya Bagi Kesehatan Manusia. *Chemical Journal*, 10(1), 50–58.
- Suhariyono, G., & Wiyono, M. (2003). Distribusi Diamater Partikel Debu PM<sub>10</sub> Dan PM<sub>2.5</sub> Dalam Udara Sekitar Kawasan Pabrik Semen, Citeureup-Bogor. *Prosiding Seminar Aspek Keselamatan Radiasi Dan Lingkungan Pada Industri Non Nuklir*, (Maret), 161–173.
- Sunardi, S. K., & Saeful, K. (2003). Penentuan Elektromotansi Termal Beberapa Jenis Termokopel Dengan Pasangan Logam Yang Bervariasi. *Physics Student Journal*, 13.
- Sutarya, D. (2008). Analisis Unjuk Kerja Thermocouple W3Re25 pada Suhu Penyinteran 1500°C. *Jurnal Bidang Bahan Bakar Nuklir-PTBN*, 16-17, (1).
- Tobaldini, E., Bollati, V., Prado, M., Fiorelli, E. M., Pecis, M., Bissolotti, G., Albetti, B., Cantone, L., Favero, C., Cogliati, C., Carrer, P., Baccarelli, A., Alberto, P., Montano, N. (2018). Acute particulate matter affects cardiovascular autonomic modulation and IFN-  $\gamma$  methylation in healthy volunteers. *Environmental Research*, 161(June 2017), 97–103.
- TSI Incorporated. (2013). P-TRAK Ultrafine Particle Counter Model 8525 Operation and Service Manual. TSI Incorporated. U.S.A. p. 1-60.
- Tugaswati, A. T. (2008). Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor. *Komisi Penghapusan Bensin Bertimbel*, 1, 1–11.
- Wardoyo, A. Y. P., Nuriyah, L., Darmawan, H. A., Firdaus, M. I., & Adi, E. T. P. (2017). Developing reheated filter of motorcycle exhaust for reducing PM<sub>2.5</sub> emissions. *Proceedings - 2017 International Seminar on Sensor, Instrumentation, Measurement and Metrology: Innovation for the Advancement and Competitiveness of the Nation, ISSIMM 2017*, 2017–January, 42–45.
- Wiranugraha, I. K. D., & Wijaksana, H. (2016). Analisa performansi kolektor surya pelat bergelombang dengan variasi kecepatan udara. *Jurnal Ilmiah Teknik Desain Mekanika*, 2016, 1–6.
- Zannaria, N. D., Roosmini, D., & Santoso, M. (2009). Karakteristik Kimia Paparan Partikulat Terespirasi. *Jurnal Sains Dan Teknologi Nuklir Indonesia*, IX, 37–50.

Zhao, Y., Gao, P., Yang, W., & Ni, H. (2018). Science of the Total Environment Vehicle exhaust : An overstated cause of haze in China. *Science of the Total Environment*, 612, 490–491. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.255>



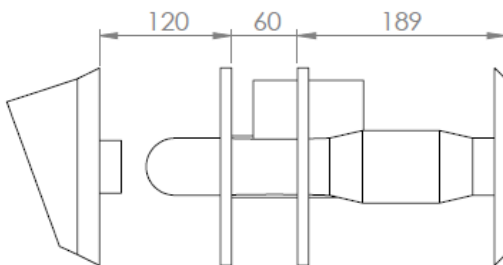


## LAMPIRAN

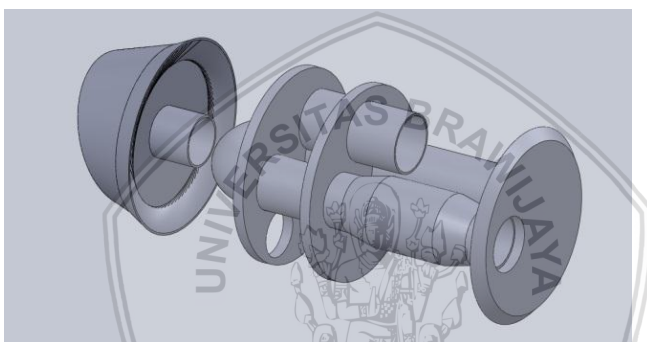


**Lampiran 1.** Konstruksi knalpot 1 tampak atas

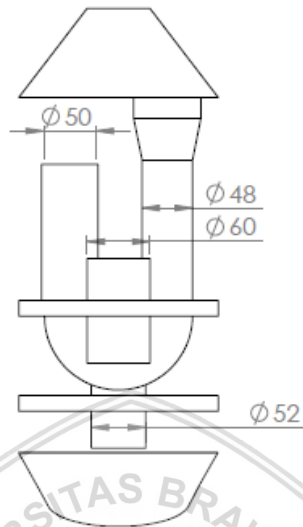
**Lampiran 2.** Konstruksi knalpot 1 tampak depan



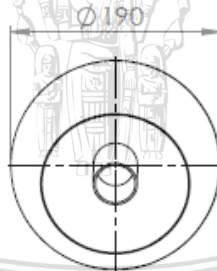
**Lampiran 3.** Konstruksi knalpot 1 tampak samping



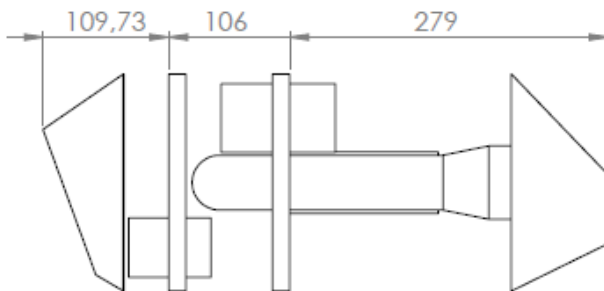
**Lampiran 4.** Knalpot 1 isometri



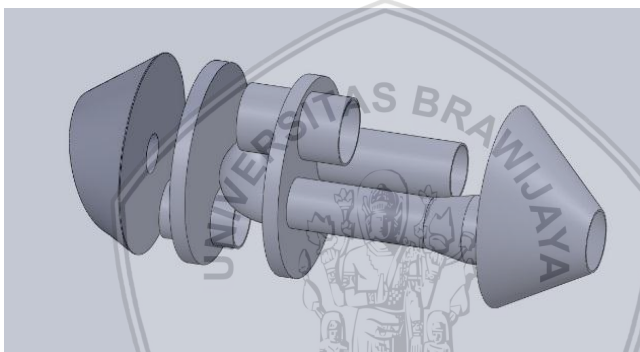
**Lampiran 5.** Konstruksi knalpot 2 tampak atas



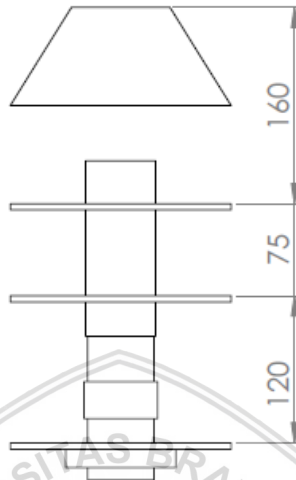
**Lampiran 6.** Konstruksi knalpot 2 tampak depan



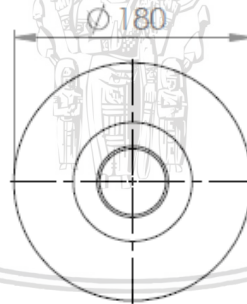
**Lampiran 7.** Konstruksi knalpot 2 tampak samping



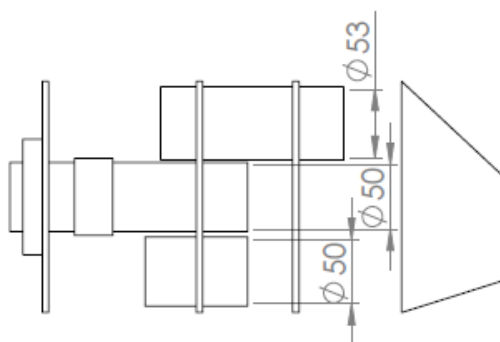
**Lampiran 8.** Knalpot 2 isometri



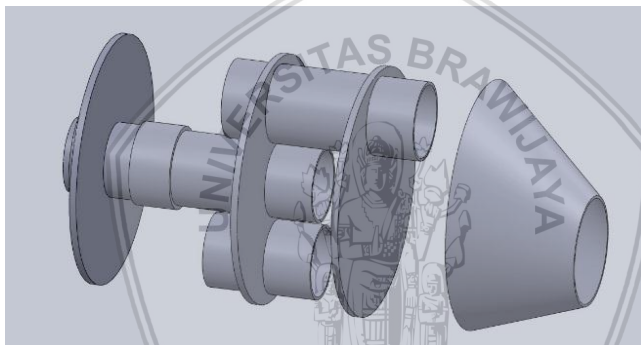
**Lampiran 9.** Konstruksi knalpot 3 tampak atas



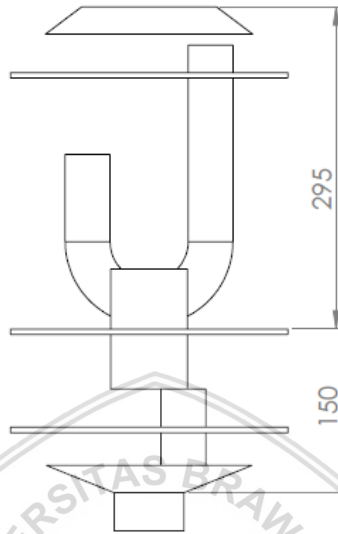
**Lampiran 10.** Konstruksi knalpot 3 tampak depan



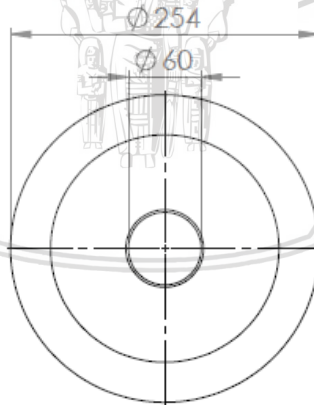
**Lampiran 11.** Konstruksi knalpot 3 tampak samping



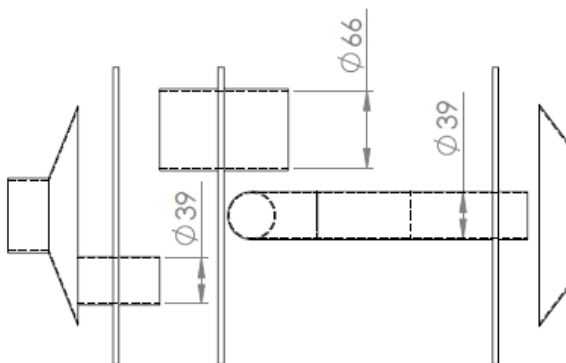
**Lampiran 12.** Knalpot 3 isometri



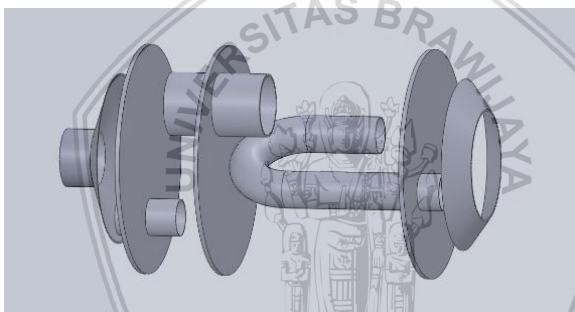
**Lampiran 13.** Konstruksi knalpot 4 tampak atas



**Lampiran 14.** Konstruksi knalpot 4 tampak depan

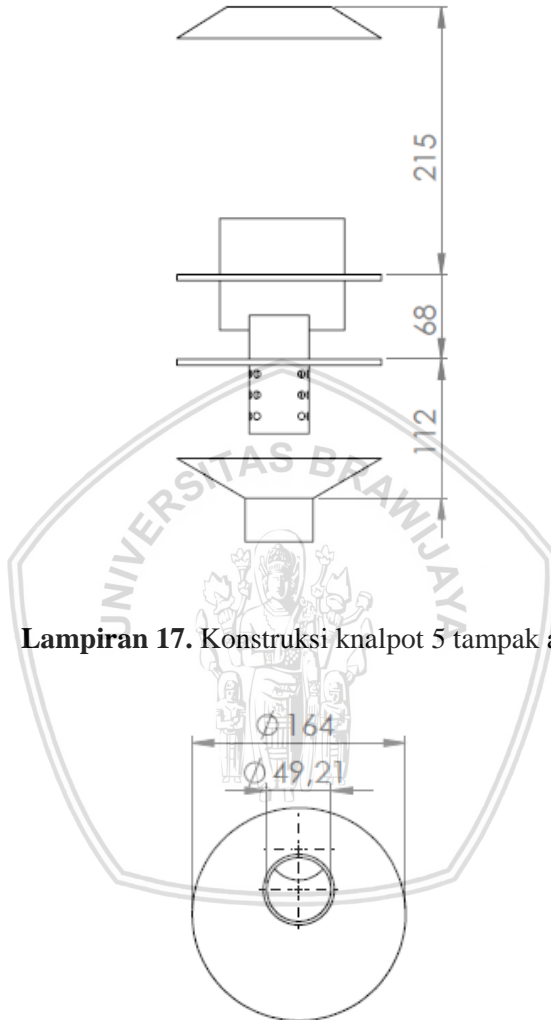


**Lampiran 15.** Konstruksi knalpot 4 tampak samping



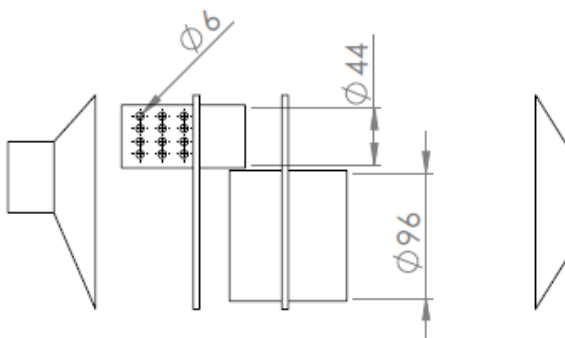
**Lampiran 16.** Knalpot 4 isometri



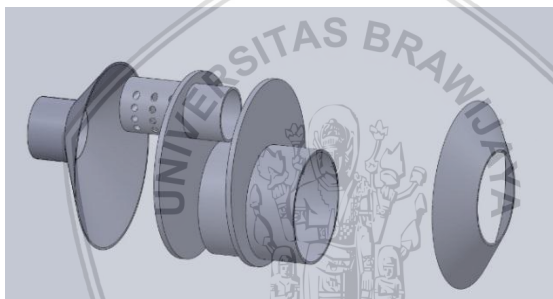


**Lampiran 17.** Konstruksi knalpot 5 tampak atas

**Lampiran 18.** Konstruksi knalpot 5 tampak depan



**Lampiran 19.** Konstruksi knalpot 5 tampak samping



**Lampiran 20.** Knalpot 5 isometri

**Persentase Pengurangan Konsentrasi  $PM_{0.1}$  Knalpot 1 (%)**

Menit	I	II	III	Mean	SD	T in	T out	$\Delta T$
5	37,23	37,28	30,26	34,92	2,33	263	46	217
10	54,45	52,77	52,16	53,13	0,69	281	51	230
15	63,78	61,04	67,85	64,22	1,98	306	60	246
20	64,51	74,41	71,95	70,29	2,98	318	66	251
25	58,85	74,40	64,58	65,94	4,54	324	71	253
30	68,17	73,95	73,86	71,99	1,91	333	72	262

**Lampiran 21.** Pengurangan konsentrasi knalpot 1

**Persentase Pengurangan Konsentrasi  $PM_{0.1}$  knalpot 2 (%)**

Menit	I	II	III	Mean	SD	T in	T out	$\Delta T$
5	32,26	32,95	29,75	31,65	0,97	254,2	29,6	224,6
10	37,14	35,42	28,43	33,66	2,66	299,8	54,9	244,9
15	43,14	33,41	33,88	36,81	3,17	309,8	62,4	247,4
20	36,27	35,05	38,69	36,67	1,07	315,6	67,8	247,8
25	34,09	34,42	35,40	34,64	0,39	317,6	70,8	246,8
30	38,10	36,36	34,15	36,20	1,15	323,2	71,6	251,6

**Lampiran 22.** Pengurangan konsentrasi knalpot 2

**Persentase Pengurangan Konsentrasi  $PM_{0.1}$  knalpot 3 (%)**

Menit	I	II	III	Mean	SD	T in	Tout	$\Delta T$
5	26,78	14,72	26,19	22,56	3,93	293	29	264
10	29,74	36,27	29,13	31,71	2,28	300	31	269
15	36,32	37,20	33,82	35,78	1,01	311	31	280
20	33,79	31,63	45,85	37,09	4,42	321	30	291
25	38,27	41,91	30,42	36,86	3,39	325	30	295
30	40,38	39,93	38,59	39,64	0,54	331	30	301

**Lampiran 23.** Pengurangan konsentrasi knalpot 3

**Persentase Pengurangan Konsentrasi  $PM_{0.1}$  Knalpot 4 (%)**

Menit	I	II	III	Mean	SD	T in	Tout	$\Delta T$
5	2,08	2,15	0,00	1,41	0,71	275	30	245
10	5,60	7,16	2,20	4,99	1,46	288	31	257
15	11,38	2,78	3,29	5,82	2,79	304	32	272
20	8,04	12,37	11,41	10,61	1,31	307	32	275
25	4,76	10,78	16,87	10,80	3,50	310	33	277
30	16,21	10,43	13,19	13,28	1,67	313	34	279

**Lampiran 24.** Pengurangan konsentrasi knalpot 4

Persentase Pengurangan Konsentrasi PM<sub>0.1</sub> knalpot 5 (%)

Menit	I	II	III	Mean	SD	T in	Tout	ΔT
5	6,79	9,58	-0,97	5,13	3,16	277	31	246
10	2,28	3,55	9,67	5,17	2,28	282	33	249
15	-1,43	13,09	14,50	8,72	5,09	283	33	250
20	3,47	12,93	12,85	9,75	3,14	296	34	262
25	8,14	5,98	21,01	11,71	4,69	300	37	263
30	19,46	14,78	13,77	16,01	1,75	307	37	270

Lampiran 25. Pengurangan konsentrasi knalpot 5

Waktu	Konsentrasi PM <sub>0.1</sub> Knalpot 1 (pt/cc)		
	I	II	III
5	15200	14080	15770
	15200	14070	15890
	15010	14690	15820
	15010	14030	15900
	15010	13920	15690
	14990	14010	15760
	14450	15000	15790
	14350	13890	15810
	14450	15100	15920
	14220	13970	16110
10	8920	8780	8150
	8900	8750	8100
	8120	8810	8350
	8040	8750	8450
	8050	8700	8560
	8070	4690	8310
	8040	8730	8230
	8420	8740	8270

	8660	8820	8170
	8540	8970	8030
15	8360	6100	5090
	6170	6100	4910
	5900	6920	6900
	7600	6970	4950
	7000	6000	7940
	8600	6830	4990
	6130	6730	4870
	6180	6620	4950
	6020	6800	5030
	6460	6690	5120
20	5000	4030	4650
	5000	4050	4660
	5130	4060	4640
	5070	4080	4550
	6130	4180	4620
	6130	4090	4520
	6160	4030	4670
	6200	4170	4780
	6200	4220	4660
	6330	4260	4730
25	3070	3470	5210
	4560	3550	5330
	3530	3520	5430
	7100	3490	5460
	7570	3480	5440
	7570	4470	5600
	7220	3460	5540
	6000	3460	5560
	6490	4350	5620

	6510	3560	5610
30	4300	3640	3910
	4250	3590	3870
	4220	3620	3710
	4330	3350	3680
	4240	3540	3690
	4330	3410	3610
	4660	4320	3780
	4680	4210	3290
	4680	3160	3330
	4300	3110	3380

**Lampiran 26.** Data Konsentrasi PM<sub>0,1</sub> Knalpot 1

Waktu	Konsentrasi PM <sub>0,1</sub> Knalpot 2 (pt/cc)		
	I	II	III
5	15700	14800	18900
	15600	14000	18700
	15100	13900	14700
	15700	13500	13300
	14000	15900	16000
	16700	16000	18100
	16900	19400	18100
	16700	15700	16000
	16600	14900	12900
	16600	14500	12900
10	10500	12200	12400
	10600	11600	12600
	11400	11900	11800
	19400	11700	12100
	10100	11000	12600
	10400	11500	12400

	10500	11300	12800
	10300	11200	12000
	10700	11000	12100
	11700	11100	12800
<b>15</b>	12100	12600	10600
	12100	12500	11200
	12100	12300	11400
	12800	12100	11500
	11200	12200	11500
	11200	10100	11400
	11200	11900	11400
	11200	10400	11200
	11000	10500	11200
	10500	11900	11200
<b>20</b>	11900	10500	10100
	10500	10200	10200
	10600	10300	10700
	10300	10500	10200
	10100	11000	10800
	10400	11200	10700
	10100	10800	10300
	10300	10100	10900
	10100	10200	10100
	10000	10300	10400
<b>25</b>	9900	9000	9190
	9500	9500	9390
	9900	9000	9050
	9200	9600	10400
	9700	9200	10100
	9900	9700	10400
	9200	9300	10700

	9900	9200	10400
	9200	9400	10100
	9100	9800	10200
<b>30</b>	8570	8940	9090
	8100	8970	9070
	8040	8980	9050
	8090	8960	9700
	8840	8980	9200
	8860	8760	9040
	8730	8900	9030
	8780	8940	9020
	8730	8200	9100
	8800	8200	9040

**Lampiran 27. Data Konsentrasi PM<sub>0,1</sub> Knalpot 2**

<b>Waktu</b>	<b>Konsentrasi PM<sub>0,1</sub> Knalpot 3 (pt/cc)</b>		
	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
<b>5</b>	16800	19000	14800
	18700	19000	14700
	16500	19900	18500
	16600	19100	18600
	16900	19200	18900
	17800	19000	17900
	17700	19600	17200
	17800	19700	17700
	17000	19800	14500
	16700	19800	14900
<b>10</b>	12900	12100	13100
	12100	10500	12000
	13100	10500	11300
	12900	10900	14100



	11900	10400	11500
	14100	12400	11200
	11100	11500	13900
	13200	11600	11900
	14700	11600	11700
	13200	11500	11700
<b>15</b>	10600	10200	11100
	10500	10500	10300
	12500	10300	10200
	12800	10100	10900
	12100	10100	11300
	12600	10900	11300
	12500	11100	11400
	12500	11400	11300
	12100	11200	12100
	12100	10200	12800
<b>20</b>	10200	10500	9100
	9700	10900	9630
	10900	10300	9460
	10100	10300	9530
	10300	10100	9590
	10600	10200	8670
	9100	10800	8550
	9100	10300	8500
	10300	10500	8610
	16700	16100	8090
<b>25</b>	9790	8590	10700
	9950	8480	10400
	8780	8320	10700
	8560	8110	10300
	8980	8460	11000

	8230	8260	10400
	8910	8700	11900
	8920	8260	10600
	8680	8030	11900
	8650	8330	9740
<b>30</b>	8050	8050	9100
	8070	8320	9090
	8200	8400	8180
	8030	8520	8150
	8440	8590	8160
	8600	8680	8910
	8400	8200	8760
	8250	8060	8360
	8150	8020	8220
	8200	8050	8240

**Lampiran 28. Data Konsentrasi PM<sub>0.1</sub> Knalpot 3**

<b>Waktu</b>	<b>Konsentrasi PM<sub>0.1</sub> Knalpot 4 (pt/cc)</b>		
	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
<b>5</b>	23800	17800	20600
	22300	23100	23700
	21000	26600	23800
	24800	24600	23300
	23600	26100	22600
	24000	20700	21200
	23200	20700	23300
	21500	20800	23400
	23100	21700	23200
	23400	20600	22100
<b>10</b>	19000	17000	16200
	16900	16300	16400

	17400	16100	16400
	16200	16500	16400
	16900	15800	16000
	17600	16500	16800
	17100	16300	17100
	16500	16800	18100
	16200	16900	18700
	19800	16400	16800
<b>15</b>	17400	17900	16600
	15700	17700	15200
	15400	18100	17500
	15400	17900	18200
	18400	15000	16600
	16600	15500	16100
	17800	16000	16800
	19200	15500	16000
	15700	15000	15900
	15800	15500	15800
<b>20</b>	14700	14900	15100
	14500	15800	15400
	14200	15100	15600
	16000	15200	13400
	14600	15100	15900
	14600	14100	14100
	15100	14600	14200
	14400	15900	14500
	14800	4900	14200
	15700	15400	14400
<b>25</b>	14000	13300	13900
	13800	12700	12800
	14100	12500	14200

	12900	12700	13300
	13600	12000	12100
	13000	12700	13500
	13900	12400	11800
	14100	13000	11600
	14400	13600	11800
	14200	13400	13600
<b>30</b>	12300	12100	13200
	12200	12000	13500
	12400	12100	11900
	12100	12800	11700
	10600	12300	11300
	11500	12900	11500
	11300	12200	12200
	11400	12900	12600
	11500	12100	11000
	10500	12200	11500

**Lampiran 29.** Data Konsentrasi  $PM_{0,1}$  Knalpot 4

<b>Waktu</b>	<b>Konsentrasi <math>PM_{0,1}</math> Knalpot 5 (pt/cc)</b>		
	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
<b>5</b>	19200	19200	20800
	23200	19300	24700
	20200	19900	24300
	21800	19300	25500
	21800	19700	20600
	23200	21100	21700
	22100	20800	21900
	23700	21300	25300
	23000	22500	22400
	21400	22700	22200

<b>10</b>	18500	20300	14700
	18200	20300	14500
	18100	20600	14800
	17900	17500	14000
	17900	15500	13700
	17800	17000	16600
	17800	17500	16700
	17500	12900	16500
	18100	14100	17100
	17900	15300	17400
<b>15</b>	18500	14000	15000
	19500	13400	15800
	19600	13700	16100
	19500	13500	13800
	19500	13400	14300
	18900	15800	14100
	18200	15500	14200
	19100	15800	14500
	19400	15400	13800
	19400	16200	14000
<b>20</b>	15900	15400	15400
	15900	13600	15500
	15900	13500	13600
	16000	13400	13600
	15700	13300	15700
	14900	13800	13700
	17900	14200	13800
	14800	13800	15500
	14800	15200	13700
	14200	13900	13900
<b>25</b>	13200	13300	12500

	12900	13500	12400
	13200	13400	13800
	12900	13200	13500
	13000	13200	12100
	12900	13000	11000
	12700	13900	11300
	14200	13900	11700
	14200	13900	11900
	13900	13900	12000
30	11000	11900	13100
	11100	11800	13900
	11000	11800	12900
	10900	11700	11100
	11000	11600	11100
	11100	11700	11500
	11200	11600	11900
	11100	11700	11100
	11900	11900	11800
	11000	11900	11200

Lampiran 30. Data Konsentrasi PM<sub>0,1</sub> Knalpot 5

Waktu	Konsentrasi PM <sub>0,1</sub> Tanpa Knalpot (pt/cc)		
	I	II	III
5	24600	18200	24600
	24700	18100	23800
	25100	24900	14700
	25200	25700	14900
	24300	27300	20000
	23600	22600	21600
	20700	25100	28700
	22900	22300	26500

	22000	22200	25600
	22500	21200	26800
<b>10</b>	18400	19300	17000
	20400	19400	17700
	14700	16200	17600
	14300	17500	17500
	19700	17600	17200
	19300	17400	17900
	18900	17400	16700
	18900	17400	16900
	19200	17600	17400
	20100	17500	16800
<b>15</b>	23400	15700	17800
	21600	15400	16900
	20400	15300	16300
	17100	17800	15600
	16500	17800	17700
	19400	17500	18300
	18600	19000	18000
	17500	19400	16900
	17800	14400	16800
	16600	16500	16000
<b>20</b>	15300	17700	16600
	18300	13200	15200
	19100	13400	17900
	15700	20000	13200
	14300	16000	14300
	14700	16100	12500
	15200	16300	17500
	16600	16500	18300
	17900	13000	20500

	14500	18700	19700
25	14400	14300	15600
	14600	14500	15500
	14900	14300	15600
	14500	14400	15200
	14300	14600	15500
	14500	14500	15800
	14600	14300	15400
	14400	14400	15300
	14300	14300	15600
	14400	14200	15200
30	15500	13600	11200
	15200	14300	11600
	13800	13700	11800
	13400	13200	11500
	13600	13200	11300
	14200	13600	12700
	13300	14600	12600
	13200	15100	18800
	12800	13700	18500
	13200	13000	18700

Lampiran 31. Data Konsentrasi PM<sub>0,1</sub> Tanpa Knalpot

Waktu	PM <sub>0,1</sub> Knalpot 1 (pt/cc)			Rata-rata	Standar Deviasi
	I	II	III		
5	14789	14276	15846	14970	462
10	8376	8374	8262	8337	38
15	6842	6576	5475	6298	418
20	5735	4117	4648	4833	476
25	5962	3681	5480	5041	694
30	4399	3595	3625	3873	263



Waktu	PM <sub>0.1</sub> Knalpot 2 (pt/cc)			Rata-rata	Standar Deviasi
	I	II	III		
5	15960	15260	15960	15727	233
10	11560	11450	12360	11790	287
15	11540	11650	11260	11483	116
20	10430	10510	10440	10460	25
25	9550	9370	9993	9638	185
30	8554	8783	9134	8824	169

Waktu	PM <sub>0.1</sub> Knalpot 3 (pt/cc)			Rata-rata	Standar Deviasi
	I	II	III		
5	17250	19410	16770	17810	812
10	12920	11300	12240	12153	470
15	12030	10600	11270	11300	413
20	10700	11000	8973	10224	632
25	8945	8354	10764	9354	725
30	8239	8289	8517	8348	86

Waktu	PM <sub>0.1</sub> Knalpot 4 (pt/cc)			Rata-rata	Standar Deviasi
	I	II	III		
5	23070	22270	22720	22687	232
10	17360	16460	16890	16903	260
15	16740	16410	16470	16540	101
20	14860	14100	14680	14547	229
25	13800	12830	12860	13163	318
30	11580	12360	12040	11993	226

Waktu	PM <sub>0.1</sub> Knalpot 5 (pt/cc)			Rata-rata	Standar Deviasi
	I	II	III		
5	21960	20580	22940	21827	685
10	17970	17100	15600	16890	692

15	19160	14670	14560	16130	1515
20	15600	14010	14440	14683	475
25	13310	13520	12220	13017	403
30	11130	11760	11960	11617	250

Waktu	PM <sub>0,1</sub> Tanpa Knalpot (pt/cc)			Rata-rata	Standar Deviasi
	I	II	III		
5	23560	22760	22720	23013	274
10	18390	17730	17270	17797	325
15	18890	16880	17030	17600	646
20	16160	16090	16570	16273	150
25	14490	14380	15470	14780	346
30	13820	13800	13870	13830	21

**Lampiran 32.** Rata-rata & standar deviasi Konsentrasi PM<sub>0,1</sub>



**Lampiran 33.** Mengukur dimensi knalpot



**Lampiran 34.** Kegiatan penelitian 1



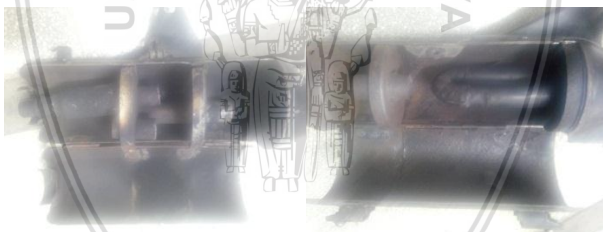
**Lampiran 35.** Kegiatan *input* data saat penelitian



Knalpot 1



Knalpot 2



Knalpot 3

Knalpot 4



Knalpot 5

**Lampiran 36.** Konstruksi knalpot 1-5